

В.И. Бондаренко  
И.А. Ковалевская  
Г.А. Симанович  
В.Г. Черватюк

$\psi_1 = 80 \dots 8$

# ГЕОМЕХАНИКА НАГРУЖЕНИЯ

крепн очистных  
и подготовительных  
выработок  
в слоистом массиве  
слабых пород

По кр

По кр



**В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская,  
Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк**

**ГЕОМЕХАНИКА НАГРУЖЕНИЯ  
КРЕПИ ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ  
ВЫРАБОТОК В СЛОИСТОМ МАССИВЕ  
СЛАБЫХ ПОРОД**

**Монография**

**Днепропетровск  
ТОВ «ЛізуновПрес»  
2012**

УДК 622.831.3:622.28

Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Черватюк В.Г. **Геомеханіка навантаження кріплення очисних і підготовчих виробок у шаруватому масиві слабких порід.** Монографія. – Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2012. – 233 с. (російською мовою).

Друкується відповідно до рішення Вченої ради Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол №6 від 26.06.2012 р.).

В монографії викладені результати шахтних досліджень та обчислювальних експериментів методом скінченних елементів з розрахунку напружено-деформованого стану елементів багатопараметричних геомеханічних систем, а також шахтні дослідження, що включають в себе очисні й підготовчі роботи при вийманні тонких і вельми тонких вугільних пластів у складних гірничо-геологічних умовах шахт Західного Донбасу.

Друкується за авторською редакцією.

Рецензенти: В.І. Бузило, д-р техн. наук, проф.

П.І. Пономаренко, д-р техн. наук, проф.

© Бондаренко В.І., Ковалевська І.А., 2012

© Симанович Г.А., Черватюк В.Г.

© ТОВ «ЛізуновПрес», 2012

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в угольной промышленности ведущих угледобывающих стран мира усиливаются процессы концентрации производства, растет производительность труда, повышается качество, мощность и надежность оборудования, во все большей степени удается обеспечивать бесперебойность производственных процессов. В этой связи успешное развитие угольной промышленности Украины, с точки зрения технической и технологической политики, возможно только при условии концентрации горных работ и интенсификации подземного производства на базе эффективного использования современной техники и технологий. Положительные результаты внедрения нового оборудования особенно ярко проявляются на передовых шахтах, где оснащение забоев очистными комплексами современного уровня позволило обеспечить стабильную добычу из одной лавы до 3-5 тыс. тонн угля в сутки.

В тонких и весьма тонких угольных пластах, например, Западного Донбасса сосредоточено более 90% общих запасов, в тоже время, горно-геологические условия этого региона отличаются рядом особенностей:

- достаточно высокие прочностные характеристики угольных пластов – коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодыяконова составляет  $f = 3...4$ ;

- углевмещающие породы преимущественно слабее самих угольных пластов ( $f = 1...4$ ), их структура характеризуется ярко выраженной слоистостью и трещиноватостью;

- достаточное количество маломощных слоев слабого песчаника и угольных пластов обводнены, что способствует значительному разупрочнению и без того слабых основных литологических разностей – аргиллитов и алевролитов.

Указанные особенности существенно ухудшают условия ведения горных работ по причине интенсивных проявлений горного давления, а тонкие и весьма тонкие угольные пласты не способствуют высокопроизводительной очистной выемке. Поэтому, для достижения высоких нагрузок на забой, впервые, например, на шахтах Западного Донбасса была применена струговая установка ГН 5.7 № 9-38; 800-1585Н "BUCYRUS". На ПСП «Шахта «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» в 161-й лаве пласта  $C_6$  смонтирована и успешно работает струговая установка ГН 9.38ve/5.7 в комплекте с крепью DBT. Выемочный участок расположен на глубине  $H = 300 - 490$  м и обрабатывается по восстанию пласта  $C_6$  (средний угол падения  $4^\circ$ ) с вынимаемой мощностью 0,9 м. В лаве длиной 300 м достигнута среднесуточная нагрузка на забой 3000 тонн, а в отдельные дни добыча доходила до 5000 тонн/сутки рядового угля. В тоже время при относительно ритмичной работе выемочного комплекса, среднесуточная скорость подвигания очистного забоя изменялась в достаточно широком диапазоне, в том числе из-за аварийных остановок, в течение



которых наблюдалось усиление проявлений горного давления в виде развития опускания кровли, повышения нагрузки на крепь и срабатывания по этим причинам предохранительных клапанов гидростоек отдельных секций – высота рабочего пространства лавы уменьшалась, что представляло опасность с точки зрения надежной работы элементов комплекса при возобновлении очистной выемки после устранения неполадок. Также отмечались колебания интенсивности проявлений горного давления при разных среднесуточных скоростях подвигания очистного забоя. Например, в течение двух месяцев 2010 года произошло 7 аварийных остановок стругового комплекса продолжительностью более 12 часов; причины аварий были разные, в том числе две из них – из-за возникновения вывалов пород кровли. Эти остановки совпали в пространстве с резким уменьшением до 0,4–0,6 м мощностей двух слоев непосредственной кровли, представленной аргиллитом и алевролитом с тонкослоистой структурой и слабым (или полным отсутствием) сцеплением со смежными литологическими разностями. Слабое сцепление наблюдается и между слоями основной кровли, также представленных аргиллитом и алевролитом общей мощностью 11,0–12,5 м, а верхней границей обрушающейся основной кровли является пласт  $C_6^1$ , по которому полностью отсутствует сцепление с нижележащими слоями. Приведенная информация по структуре и свойствами надугольной толщи представляет ценность с точки зрения анализа данных компьютерного мониторинга процесса нагружения секций крепи и его проецирования на геомеханику сдвижения пород кровли пласта как основного фактора по формированию нагрузки на механизированную крепь.

Компьютерный мониторинг осуществлялся путем периодического съема данных, поступающих в систему управления рабочими процессами в лаве. Систематизировались показания давления в поршневых полостях гидростоек при их положении распора. В этой связи, используя показания давлений в гидростойках, одной из основных задач исследований было изучение процесса формирования нагрузки во времени в период остановки забоя с целью поиска решений по предотвращению посадки крепи комплекса на «жесткую базу» при отработке пологих угольных пластов в сложных горно-геологических условиях шахт, например, Западного Донбасса.

Главы 4 и 5 написаны с В.В. Фомичевым, глава 2 – с Е.С. Сай, а главы 8, 9 и 10 – с М.С. Демидовым. Авторы выражают глубокую благодарность О.К. Маловой за подготовку рукописи к изданию.

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## 1.1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модели и моделирование используются человечеством с давних времен. С помощью моделей развивались язык, письменность, графика; наскальные изображения наших пращуров, позднее картины и книжки – это модельные, информационные формы передачи знаний об окружающем мире следующим поколениям. Модели применяются при изучении сложных явлений, процессов, конструировании новых сооружений – хорошо построенная модель, как правило, более доступная для исследований, чем реальный объект; кроме того, некоторые объекты вообще не могут быть изучены непосредственными исследованиями.

Изначально элементы математики появились в связи с необходимостью решения задач практики: измерения местности и объектов, навигации и др. Вследствие этого математика была численной математикой – ее целью было получение решения в виде числа. Численное решение всегда интересовало математиков, величайшие из которых совмещали в своих исследованиях изучение явлений природы, получение их математического описания и его анализ. Прежде всего, анализ усложненных моделей поставил требование создания специальных численных методов решения задач. Название некоторых из таких методов – метод Ньютона, Эйлера, Лобачевского, Гаусса, Чебышева, Эрмита – свидетельствуют о том, что их разработкой занимались величайшие ученые своего времени.

*Первый период* математического моделирования начался три-четыре тысячи лет назад. Он был связан с обсчитыванием плоскостей и объемов, расчетами несложных механизмов; другими словами, с простыми задачами арифметики, алгебры и геометрии. Вычислительными средствами были собственные пальцы, а потом – счеты; исходные данные содержали мало цифр и большинство вычислений выполнялись точно без округления.

*Второй период* начался с Исаака Ньютона, когда решались задачи астрономии, геодезии и расчета механических конструкций, которые сводятся к обычным дифференциальным уравнениям, или алгебраическим систем с большим количеством неизвестных. Обычно вычисления выполнялись с округлением, но иногда от результата требовались высокая точность, так что приходилось сохранять до восьми значащих цифр. Вычислительные средства стали разнообразнее: таблицы элементарных функций, арифмометр, логарифмическая линейка; в конце этого периода появились достаточно сложные калькуляторы механического типа.

*Третий период* начался со середины 40-х годов XX века – стимулом послужили задачи, возникшие в ходе боевых операций Второй мировой войны. Большие скорости движения боевых машин нападения (самолетов, танков, кораблей) требовали разработки эффективных средств активной защиты. За решение этой проблемы взялись выдающиеся ученые того времени; среди них был Норберт Винер – известный американский математик. В этом смысле рассмотрим для примера одну из прикладных задач, которая нуждалась в решении Винера. Для эффективной стрельбы средств противовоздушной обороны необходимо предусмотреть будущее положение самолета, т.е. экстраполировать его траекторию на некоторое время вперед, чтобы снаряд и самолет одновременно попали в «точку встречи». Однако точно угадать будущую траекторию самолета невозможно, поскольку пилот, который выполняет противозенитный маневр, может поступить «достаточно» своевольно. Поэтому траекторию нужно считать случайной, а оружие, которое ведет стрельбу, должно предусматривать случайную траекторию; именно такую задачу поставил Н. Винер как математик. На первый взгляд он взялся за полностью безнадежную задачу, так как угадать, как пройдет случайная траектория просто невозможно, на то она и случайная. Точное предусмотрение траектории здесь невозможно, но при стрельбе зенитным снарядом особой точности и ненужно. И вдобавок, случайности в траектории полета самолета не так и много, поскольку его маневр ограничен физическими законами движения самолета и его конструкцией. Остаточную неопределенность можно отнести на счет случайности, которую можно предусмотреть только приблизительно статистическими методами. Эту задачу и решил Н. Винер – способ, который он предложил, требовал большого объема вычислений, их необходимо было сделать за те мгновения, пока самолет приближался к цели. Поэтому стали нужны новые принципы вычислений, исключающие механику; они дали толчок к созданию электронных вычислительных машин (ЭВМ).

Начиная с 50-х годов XX века, наука вплотную приблизилась к изучению явлений, где причина и следствие отличаются на несколько порядков; благодаря этим явлениям возникли электронные лампы, транзисторы, компьютеры, лазеры и т.п. В большинстве случаев данные явления очень плохо подвергаются традиционным методам анализа. В дальнейшем, в процессе развития и совершенствования, это направление теоретического анализа трансформировалось в новую современную технологию и методологию проведения теоретических исследований, которая получила название вычислительного эксперимента [1]. Основой вычислительного эксперимента является математическое моделирование, теоретической базой – прикладная математика, а технической – мощные электронно-вычислительные машины.

Математические модели являются одним из основных инструментов познания человеком явлений окружающего мира. Под математическими моделями понимаются основные закономерности и связи, которые характеризуют изучаемое явление. Это могут быть формулы или уравнения, наборы правил или требований, которые выражены в математической форме. Много веков в

математике, механике, физике и других точных науках естествознания для описания разнообразных явлений использовались математические модели.

В основе любой математической модели положен конкретный алгоритм, указывающий на последовательность вычислительных и логических операций, выполняемых для получения численного решения. С алгоритмами связана вся история математики – само слово «алгоритм» является производной от имени средневекового узбекского ученого Аль-Хорезми. Еще древнегреческим ученым был известен алгоритм нахождения числа «пи» с высокой точностью. Ньютон предложил эффективный численный метод решения алгебраических уравнений, а Эйлер – численный метод решения обычных дифференциальных уравнений. Как хорошо известно, модифицированные методы Ньютона и Эйлера до сих пор занимают почетное место в арсенале вычислительной математики.

Что касается математического моделирования, то сейчас можно говорить о трех его поколениях. Первое – речь обычно идет о математических записях отдельных феноменологических наблюдений над реальными объектами. Для них характерна простота описания, типичная линейность уравнений и малая размерность (часто воспроизводится всего одна или две переменных). Методы анализа связаны в основном с получением аналитических решений. Второе поколение – появляются модели, которые воссоздают объект «во всей его полноте» – модель отображает структуру и законы функционирования объекта, модели становятся существенно нелинейными, чисто математический аппарат дополняется логико-семантическим. Растет размерность до нескольких десятков переменных – такие модели носят название «сложных» или «больших», а рабочим инструментом становится вычислительный эксперимент. В наше время начинается переход к третьему поколению математических моделей – моделям виртуального мира, которые можно охарактеризовать как воспроизведение трехмерного мира компьютерными средствами. При этом резко растет объем обрабатываемой и воспроизводимой информации, например, количество визуализируемых «деталей» отображение достигает нескольких тысяч.

Начало развития технологии вычислительного эксперимента приходится на 50-е года XX века. Дата появления первого серьезного результата вычислительного эксперимента в СССР зафиксирована официально – 1968 год, когда Госкомитет СССР по делам открытий и изобретений удостоверял открытие явления, которого на самом деле никто не наблюдал, – это было открытие так называемого эффекта  $T$ -слоя (температурного токового слоя в плазме). В данном случае вычислительный эксперимент предшествовал натурному, который уже «заказывался» по результатам математического моделирования. В последние годы ряд Нобелевских премий по химии, медицине, экономике, физике были присуждены роботам, методологическую основу которых составляло математическое моделирование.

Вычислительный эксперимент, в отличие от натурных экспериментальных установок, позволяет накапливать результаты, полученные при исследовании

довании какого-либо круга задач, а потом быстро и гибко применять их к решению задач в совсем других областях, что свидетельствует об универсальности многих математических моделей.

Потребности вычислительного эксперимента при изучении явлений в наиболее сложных областях науки (физика элементарных частиц, геофизика и прочие) связаны с необходимостью обеспечить предельно возможную вычислительную мощность. Выход был найден в коллективном использовании вычислительных мощностей через компьютерные сети.

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент – ведущие методологии изучения глобальных процессов и явлений на Земле. Проведение работ по глобальному моделированию стимулировалось деятельностью Римского клуба, негосударственной организации. Первая из таких моделей была опубликована в 1971 году американским специалистом по теории управления Д. Форрестером. Компьютерные игры, проведенные Форрестером с глобальной моделью, показали, что в середине XXI века человечество ждет кризис, связанный, прежде всего, с истощением природных ресурсов, падением численности населения и производства продовольствия, ростом загрязнения окружающей среды. Известны результаты глобального моделирования явления «ядерной зимы», выполненные в Вычислительном Центре АН СССР, которые предоставили человечеству, в том числе политикам, неопровержимые аргументы против ядерной войны, даже так называемой «ограниченной ядерной войны».

Заметим, что многие фундаментальные проблемы прикладного моделирования впервые были выявлены И.А. Полетаевым. Он первым предоставил оригинальную классификацию моделей по целям их использования: «поисковая» модель – для проверки гипотез, «портретная» – для замены объекта в эксперименте (например, для тренажеров, которые в то время рассматривались почти как научная фантастика) и «исследовательская модель», что в современном понимании означает ориентацию на сложный вычислительный эксперимент. В качестве примера можно привести тот факт, что к началу 70-х годов XX века были обнаружены новые явления (точнее на них не обращали внимания) – уединенная волна («саметон»), возникающая вследствие землетрясения, которая имеет странную стойкость и распространяется в океане на большие расстояния почти без потери мощности. Это было смоделировано в вычислительном эксперименте и наблюдалось на практике. Математическая теория этого явления неизвестна, а численные исследования позволили выяснить условия возникновения, распространения и свойства данного явления.

В период с 1850 по 1875 годы, благодаря усилиям Максвелла, Кастильяно и Мора, а до них – Навье и Сен-Венана, были выработаны основные концепции теории анализа стержневых конструкций, которые стали источниками матричных методов строительной механики; спустя восемьдесят лет эти исследования стали основой метода конечных элементов (МКЭ).

Развитие теории и вспомогательных дисциплин, которые относятся к МКЭ,

было очень медленным в период с 1875 до 1920 годов. Это было обусловлено в основном реальными трудностями при решении алгебраических уравнений, как только число неизвестных становилось большим. Относительно конструкций, которые в то время представляли наибольший интерес, – рам и ферм – практически всегда применялся подход, основанный на задании распределения напряжений с параметрами нагрузки в качестве неизвестных. Приблизительно с 1920 года усилиями Мейни в США и Остенфельда в Нидерландах были сформулированы основные идеи численного исследования рамных и фермовых конструкций, основанные на задании перемещений в качестве неизвестных параметров. Эти разработки предшествовали современным матричным методам исследования конструкций. До тех пор пока в 1932 году Харди Кросс не предложил метод моментных распределений, важнейшим сдерживающим фактором при анализе была размерность задач, определяемая числом неизвестных параметров перемещений или нагрузок. Метод моментных распределений позволил численно исследовать поведение конструкций в задачах, на порядок более сложных, чем самые трудные из задач, которые решались с помощью прежде существующих методов. Этот метод стал основой численного исследования поведения конструкций на следующие 25 лет.

Вычислительные машины появились в начале пятидесятых годов, но их истинное значение, как в теоретических, так и прикладных аспектах, не было в то время столь очевидным. Все же некоторые ученые, предвидевшие влияние вычислительных машин, осуществили попытки сформулировать в удобной для компьютеров матричной форме хорошо разработанные к тому времени алгоритмы расчета фермовых конструкций. В исследованиях Аргириса, Келси и Тернера были объединены подходы, которые используют при расчетах фермовых конструкций, с подходами, применяемыми при расчете сплошных сред. Эти работы оказали решающее влияние на развитие метода конечных элементов в последующие годы. Уже до 1950 года в работах Куранта, Мак-Генри и Хренникова были отображены практически все ключевые позиции, которые характеризуют решение задач методом конечных элементов. Начиная с середины пятидесятых годов, метод конечных элементов в своем развитии прошел через ряд непрерывных модификаций. В развитии МКЭ принимали участие такие ученые как Зенкевич, Оден, Фриз, Победря и другие. Исследователи выписали конечно-элементные соотношения для твердого деформированного тела, упругих пластин и других конструктивных форм. Как только были получены соотношения для исследования статического поведения линейно упругого материала, внимание специалистов привлекли такие аспекты, как динамическое поведение, разнообразные формы потери устойчивости конструкций, геометрическая и физическая нелинейности. Вслед за этими исследованиями наступил период интенсивного развития вычислительных программ, которые реализуют МКЭ и позволяют большому числу специалистов использовать полученные результаты в своих работах.

## 1.2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Непрерывный рост объема знаний и глубины представлений о физических явлениях привели к необходимости создавать более сложные модели, которые более адекватно описывают не только предметы, но и процессы: универсальным подходом в этом случае стало математическое моделирование. *Математическая модель* – это модель реального объекта или процесса, которая создана на основе систем математических уравнений, описывающих конкретный процесс или объект. *Компьютерная модель* – это математическая модель, которая реализована компьютерными средствами. Если состояние системы изменяется во времени, то модель носит название *динамической*, в противном случае – *статической*.

Настоящее время характерно интенсивным расширением приложений математики, что связано с созданием и развитием новых поколений вычислительной техники. Расширение возможностей приложений математики обусловлено математизацией других разделов наук: химии, биологии, экономики, психологии и конкретных разделов технических наук. Процесс математизации состоит в построении математических моделей явлений и процессов и разработке методов их исследования. В некоторых направлениях исследования доверие к результатам численных расчетов так велико, что при возникновении существенной разности между результатами численных расчетов и результатами эксперимента в первую очередь ищут ошибку в результатах эксперимента.

*Вычислительный эксперимент* – метод изучения объектов или физических процессов с помощью математического моделирования. Он предусматривает, что после построения математической модели проводится ее численное исследование, позволяющее определить поведение системы в разнообразных условиях или различных модификациях [2]. Численное исследование модели дает возможность определить разнообразные характеристики процессов, оптимизировать конструкции или режимы функционирования проектируемых устройств. Случается, что в ходе вычислительного эксперимента исследователь неожиданно открывает новые процессы и свойства, о которых раньше не было известно.

Процессы в системе могут происходить по-разному в зависимости от условий, в которых находится система, а следить за поведением реальной системы при разнообразных условиях бывает трудно, иногда просто невозможно. В таких случаях, построив модель, можно многократно возвращаться к начальному состоянию и следить за ее поведением. Этот исследовательский прием называется имитационным моделированием. Теоретическая основа этого метода была известна давно, однако до появления компьютеров он не мог найти сколь-нибудь широкого применения, так как моделировать случайные величины вручную – очень трудоемкая работа.

После появления электронных вычислительных машин начали быстро

развиваться новые методы, которые сориентированы прямо на ЭВМ, например, метод Монте-Карло [3]. При решении задачи, первая стадия работы – формулирование математической модели (постановка задачи). Для физического процесса модель обычно состоит из уравнений, которые описывают процесс. В эти уравнения в виде коэффициентов входят характеристики тел или веществ, участвующих в процессе. Любое изучаемое явление бесконечно сложно, оно связано с другими явлениями природы. Поэтому математическая модель должна охватывать важнейшие для данной задачи особенности явления, так как если модель выбрана недостаточно тщательно, то какие бы методы мы не применяли для расчета, все выводы будут недостаточно надежны, а в некоторых случаях могут быть полностью ошибочными. После того как поставлена задача, разрабатывается алгоритм ее решения, т.е. сам численный метод.

Область применения и возможности вычислительного эксперимента возрастают вместе с развитием вычислительной техники. Возрастают сложность и разнообразие решаемых задач: большой объем информации, получаемой в ходе эксперимента, нуждается в адекватных способах ее представления; вместо массивов численных данных и простых графиков все шире используются наглядные визуальные образы [3, 4], что облегчают полноценное и своевременное осмысление полученных результатов. Достоинства вычислительного эксперимента вывели его в число основных исследовательских приемов таких важных физических и инженерно-технических проблем как задачи ядерной энергетики, освоение космического пространства, геофизики и прочие. Программные комплексы, которые обслуживают вычислительный эксперимент, объемные и сложные. Для их создания привлечен многочисленный отряд программистов. Поэтому особую актуальность приобретает изучение конфигурационных построений, которые постоянно находятся в центре внимания такого рода разработок. Дело в том, что в вычислительном эксперименте программа сравнивается с экспериментальной установкой, от первых опытов с которой едва ли нужно ожидать сколь-нибудь интересных результатов. Данные первых опытов служат точкой отсчета продолжительного процесса изменений и усовершенствований, который только и способен привести к достаточно обоснованным выводам об исследуемом объекте. Таким образом, появление первоначальной версии программы только в самых общих чертах намечает направление исследований. Основная же работа относительно программирования еще впереди – она связана с многократными модификациями программы, которые отображают эволюцию математической модели и методов ее расчета. Количество циклов вычислительного эксперимента, каждый из которых сопряжен с модификацией расчетной программы, часто достигает десятков тысяч. Поэтому рациональная организация таких модификаций – ключ к эффективному программированию данного класса задач.

Сложность математических моделей, а также необходимость хранения многочисленных вариантных модулей приводят к тому, что характерные



размеры программного фонда вычислительного эксперимента оказываются довольно внушительными [5]. Число модулей, которые принимают участие в расчетах, часто достигает нескольких тысяч, а суммарная длина текстов программ – сотен тысяч строк. Организовать эффективное функционирование и развитие такого большого, сложного и специфического программного хозяйства очень тяжело. Вместе с тем жизнь показала, что все перечисленные трудности можно преодолеть методом вычислительного эксперимента. Было успешно решено много важных практических задач. Эти задачи можно разбить на ряд элементарных, таких как вычисление интеграла, решение дифференциального уравнения и тому подобное. Многие элементарные задачи являются несложными, они хорошо изучены, для них уже разработаны методы численного решения и существуют стандартные программы [5, 6]. Иногда приходится слышать, что настала эпоха ЭВМ, а «ручные» расчеты являются архаизмом. На самом деле это далеко не так: прежде чем поручить ЭВМ большую задачу, надо сделать много оценочных расчетов и на их основе понять, какие методы оказываются эффективными для данной задачи. Информационную поддержку деятельности пользователей осуществляет ряд систем поиска и выбора целесообразного алгоритма и программ. При проведении вычислительного эксперимента исследователь с помощью пользовательского интерфейса может «проигрывать» на модели разнообразные варианты, которые интересуют специалиста [7]. Таким образом, исследователь получает мощный инструмент для анализа и прогноза поведения сложных нелинейных многопараметрических объектов и явлений, изучение которых традиционными методами затруднено или вообще невозможно.

К важным положительным качествам вычислительного эксперимента следует отнести его универсальность, которая позволяет легко переносить эту технологию на исследование других объектов. Данное обстоятельство характерно вообще для математического моделирования и порождено тем, что много явлений и процессов имеют одни и те же математические модели. Многоцелевая направленность и методологическая универсальность вычислительного эксперимента позволяет на основе накопленного опыта математического моделирования, банка вычислительных алгоритмов и программного обеспечения быстро и эффективно решать новые задачи.

Второй особенностью вычислительного эксперимента, как технологии научных исследований, является его междисциплинарный характер. Мы постоянно подчеркиваем это обстоятельство, говоря, что прикладной математик объединил теоретика и экспериментатора для более быстрого достижения общей цели. Вычислительный эксперимент может рассматриваться как удобная форма кооперации умственного труда, который повышает его производительность [8]: в едином цикле вычислительного эксперимента работает теоретик, экспериментатор, прикладной математик и программист.

Нужно отметить следующие особенности и преимущества вычислительного эксперимента перед натурным экспериментом. Во-первых, вычислительный эксперимент проводится даже тогда, когда натурный эксперимент

невозможен, например, моделирование глобальных климатических изменений при использовании ядерного оружия. Во-вторых, при применении вычислительного эксперимента резко снижается стоимость разработок и экономится время. Это обеспечивается многовариантностью расчетов, простой модификации математических моделей для имитации тех или иных реальных условий. В качестве иллюстрации заметим, что расчеты на компьютерах в значительной мере заменили эксперименты в аэродинамических трубах при создании космического корабля многоразового использования Шаттл [6, 7]. Создание новых изделий и технологий связано с необходимостью тяжелой, дорогостоящей и продолжительной доводки. Вычислительные средства позволяют в значительной степени сэкономить средства и время именно на этой стадии разработки.

Вычислительный эксперимент нужно рассматривать как новую технологию научных исследований на перспективу, как тенденцию, как логику развития организации научных исследований. В настоящее время вычислительный эксперимент обычно реализуется в узком смысле по цепочке «заказчик-прикладной математик». Более тесное соединение теоретических и экспериментальных исследований в единой технологии научных исследований является неуклонной тенденцией нашего времени и основным связующим звеном этой методологии служит математическое моделирование и вычислительный эксперимент.

Быстро развивается направление вычислительной математики – численные методы оптимизации [9], которые изучают экстремальные (наибольшие или наименьшие) значения функционалов на множествах структуры. В первую очередь нужно вспомнить задачи математического программирования (линейного и динамического), к которым сводятся много задач экономики. К задачам оптимизации примыкают минимаксные задачи, возникающие при решении задач исследования операций и теории игр. Особенно сложные задачи типа *min/max* возникают при решении многошаговых (динамически развивающихся) игр. Здесь даже математический эксперимент (проигрывание вариантов поведения игроков) невозможен без использования мощных ЭВМ. Решение сложных задач (особенно задач больших размеров) вызвало к жизни одно из главных направлений в теории численных методов – исследование устойчивости методов и алгоритмов к различного рода ошибкам [10]. Неустойчивые задачи нуждались в специальном определении понятия приближенных решений и развития соответствующих методов для их нахождения. К неустойчивым относится широкий класс задач, которые связаны с проблемами автоматизации обработки результатов экспериментов. Применение ЭВМ непрерывно расширяет круг пользователей и потому возникает тенденция автоматизации такой степени, при которой делается менее существенным знакомство пользователей с численными методами. Это предъявляет новые требования к алгоритмам и стандартным программам решения типовых задач.

Появление машин следующего поколения с большим быстродействием обусловило возникновение узкого звена в системе человек-машина: ско-

рость программирования, что вызвало к жизни новый этап программирования – создание алгоритмических языков с трансляторами для перевода с алгоритмического языка на внутренний язык машины. Вследствие большой близости алгоритмических языков к общечеловеческому, их внедрение упростило программирование и существенно расширило круг пользователей. Перспективным направлением реализации данной технологии является использование универсальных суперкомпьютеров с массовым параллелизмом и программированной архитектурой. Для создания вычислительных систем разрабатываются инструментальные системы программирования реального времени на основе унифицированных аппаратных средств суперкомпьютеров. Алгоритмически сформулированная для решения задача поступает на формализатор – комплекс программно-математических средств для анализа алгоритма в соответствии с требованиями к параметрам суперкомпьютера. Преобразование алгоритма в форму, эффективную для решения задачи, осуществляется путем преобразования информационного графа задачи в кадровую форму и разделения алгоритма на структурную и процедурную компоненты. Структурная компонента представляется в виде аппаратно реализуемых фрагментов вычислений (кадров), а процедурная компонента – в виде последовательности их вызова. Формирование процедурной компоненты включает следующие этапы:

- разделение информационного графа на подграфы по критерию минимизации времени решения задачи;
- формирование ограничений на размещение данных в каналах распределенной памяти в соответствии с требованиями на допустимое число каналов;
- формирование бесконфликтных структур и синтез процедур адресации и смены коммутации.

Выделение структурной и процедурной компонент алгоритма позволяет определить минимальный базовый граф, правила его наращивания и представить прикладную задачу в виде индуктивной программы. Эта программа может быть выполнена при любом сочетании базовых модулей суперкомпьютера. Параметрами индуктивной программы является количество базовых модулей и их сочетания, а трансляция задачи в машинные коды (команда настройки макропроцессоров и коммутаторов, операторы контроллеров расширенной памяти) выполняется на заключительном этапе разработки комплекса.

В последнее время получили широкое распространение программные пакеты, ориентированные на проведение вычислительного эксперимента, которые создаются коммерческими разработчиками для решения научно-практических задач [8, 11, 12]. Данные программные пакеты представляют собой инструментальную среду создания математических моделей, на основе которых потом реализуется вычислительный эксперимент. Рассмотрим наиболее популярные из подобных программных продуктов. Пакет *Mathematica* реализован для различных компьютеров, совместимых с IBM PC, Macintosh, рабочими станциями Next и Sun, а также суперкомпьютерами Gray. Пакет *Mathematica* относится к компьютерным системам символьной

математики. Эта особенность позволяет получать решение не только для конкретных данных, но и в общем виде. Пакет ориентирован на научных работников и математиков-аналитиков, он содержит большой набор численных методов и алгоритмов, имеет современный интерфейс. Разработчик пакета – фирма Wolfram Research Ltd (США). Первая версия пакета вышла в 1998 году. Программный пакет относится к интерпретирующим системам, реализующим анализ и интерпретацию данных. Вычислительная среда позволяет пользователю самому добавлять новые функциональные возможности, что обеспечивает адаптацию системы под различные специфические задачи. Совершенствование этого программного продукта ведется в направлении разработки универсального ядра системы, обеспечивающего работу на разнообразных вычислительных платформах.

Еще одним мощным математическим инструментарием является пакет Matlab (Matrix Laboratory). Пакет предназначен для математического моделирования и обеспечивает проведение исследований во многих областях научно-технического применения. Структура пакета позволяет эффективно совмещать разные подходы к созданию математических моделей, включая аналитический и имитационный. В основу имитационного моделирования положен статистический эксперимент, пакет содержит язык объектно-ориентированного программирования. Около 30 инструментальных приложений пакета позволяют обеспечить решение дифференциальных и алгебраических уравнений, интегральное исчисление, символьные вычисления и прочее. Кроме стандартного набора математических функций пакет содержит также и нетрадиционные алгоритмы – средства цифровой обработки изображений, поиска решений на основе нечеткой логики, аппарат построения и анализа нейронных сетей. Matlab может работать с операционными системами Windows, UNIX, MacOS.

Настоящим лидером на рынке математических пакетов есть MathCad, этот программный продукт сориентирован на решение разнообразных задач анализа и интерпретации информации: решение отдельных алгебраических уравнений и их систем, обыкновенных дифференциальных уравнений и их систем, дифференциальных уравнений в частных производных, статистическая обработка данных (интерполяция, экстраполяция, аппроксимация и прочее), работа с векторами и матрицами, поиск экстремума функциональных зависимостей. К системе интегрированы средства символьной математики, которая обеспечивает численное и аналитическое решения разнообразных задач.

На современном историческом этапе для решения инженерных и научно-практических задач на основе твердотельного моделирования используют системы инженерного проектирования (AutoCAD, SolidWorks, Космос 3Д). Модели, созданные с помощью этих программных средств, затем, при проведении вычислительного эксперимента, используются в системах инженерных расчетов, таких как NASTRAN, DesingSTAR или Cosmos M. В последнее время, в данном сегменте прикладных исследований наиболее популярными стали интегрированные системы инженерного проектирования и

расчетов, позволяющие не покидать привычной среды разработки изначальной математической модели и здесь же выполнять вычисления и обрабатывать полученные результаты. Примером такой широко распространенной интегрированной системы является SolidWorks Office 2011 и ему подобные.

На данный момент наиболее распространенным программным комплексом решения разнообразных задач методом конечных элементов является пакет фирмы ANSYS Inc. Это коммерческий продукт, разрабатываемый с 1970 года, стал одним из пионеров внедрения конечно-элементного анализа (FEA). Разработка данного пакета также способствовала становлению индустрии компьютерного проектирования (CAE).

В настоящее время программа ANSYS работает в среде операционных систем самых вычислительных машин – от PC до рабочих станций и суперкомпьютеров. Особенностью программы является файловая совместимость различных версий семейства ANSYS для всех используемых платформ. А это значит, что модель, созданная на персональном компьютере, может быть обработана на суперкомпьютере. Многоцелевая направленность программы, заключающаяся в реализации средств для описания отклика системы на воздействия различной физической природы, позволяет использовать одну и ту же модель для решения таких связанных задач, как прочность при тепловой нагрузке, влияние магнитных полей на прочность конструкции, тепломассоперенос в электромагнитном поле. Это обеспечивает широкие возможности при использовании программы для решения широкого круга инженерных задач.

Для исследователей, реализующих горнотехнические задачи, эта программа предлагает непрерывно растущий перечень расчетных средств, которые могут учесть разнообразные конструктивные нелинейности; делает возможным рассмотреть самый общий случай контактной задачи для поверхностей; допускает наличие больших (конечных) деформаций и углов поворота; позволяет выполнить интерактивную оптимизацию и анализ влияния электромагнитных полей, получить решение задач гидроаэродинамики и тому подобное – вместе с параметрическим моделированием, адаптивным перестроением сетки, использованием  $p$ -элементов и обширными возможностями создания макрокоманд с помощью языка параметрического проектирования программы ANSYS (APDL).

В программе ANSYS используются три итеративных алгоритма: высокоэффективный алгоритм *PowerSolver* на основе метода обусловленных сопряженных градиентов (PCG), алгоритм на основе метода сопряженных градиентов *Якоби* (JCG) и реализация метода частично сопряженных градиентов *Чолески* (ICCG). Имея в своем распоряжении эти средства, исследователь может выбрать наиболее подходящее для успешного решения своей задачи. В общем случае для больших и сложных задач предпочтительно использовать итеративный решатель. Он дает возможность получить более эффективное решение пространственных задач различной физической природы и других трудоемких видов анализа, математически описываемых раз-

реженными, симметричными, положительно определенными матрицами.

*Модуль ANSYS Design Data Access (DDA)* обеспечивает передачу в программу моделей, созданных средствами компьютерного проектирования сторонних разработчиков (CAD), что позволяет расширить диапазон средств трехмерного моделирования, используемых на начальном этапе постановки задачи. Программные средства DDA Connection могут работать совместно с разработками многих ведущих поставщиков CAD-программ, включая компании Parametric Technology Corporation, EDS/Unigraphics и Computervision Corporation. Последняя версия представлена программным модулем DDA Interactive, позволяющим использовать для конечно-элементного анализа непосредственно CAD-модели, что достигается за счет современного интерфейса между CAD-данными и исходными данными, вводимыми для проведения анализа.

*ANSYS/Multiphysics* – является наиболее мощным и многоцелевым программным пакетом в семействе программ ANSYS. Он представляет собой программное средство анализа для широкого круга инженерных дисциплин, которое позволяет проводить вычислительные эксперименты в таких отдельных областях знаний как прочность, распространение тепла, механика жидкостей и газов или электромагнетизм, но и решать связанные задачи. Этот вариант поставки программного комплекса обеспечивает возможность оптимизации проектных разработок с привлечением широкого спектра описания физических сред, что позволяет выполнять моделирование в наиболее полной постановке.

В настоящее время рынок программных систем в области физико-математических приложений продолжает возрастать. Новые программные пакеты разрабатываются на основе современных компьютерных технологий с использованием достижений новейших методов исследований. В результате создаются программные средства, которые способны решать сложные научно-технические задачи.

Таким образом, появление и развитие математического моделирования объективно связано с историей развития человечества и его возрастающими нуждами экономической деятельности. Во все времена величайшие ученые работали над получением более или менее адекватного математического описания реальных объектов, явлений или процессов, что вызвало появление целого направления – численных методов решения задач. Со временем возникла новая методология и технология решения задач, получившая название вычислительный эксперимент, теоретической базой которого является прикладная математика, а технической – мощные ЭВМ. Область применения и возможности вычислительного эксперимента расширяются вместе с развитием вычислительной техники, возрастают сложность и разнообразие решаемых задач. Сейчас вычислительный эксперимент необходимо рассматривать как новую технологию научных исследований и в перспективе – их новую организацию относительно эффективного решения проблем, стоящих перед человечеством.

## 2. ОБЩИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 2.1. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В задачах геомеханики применение математического эксперимента позволяет избегать лишних трудоемких натурных исследований, постановка которых не только нуждается в значительных финансовых затратах, но и приводит к существенным потерям времени на производстве. Вычислительный эксперимент в отличие от натурального позволяет накапливать результаты, которые получены при исследовании определенного круга задач, а потом быстро и гибко применять их к решению аналогичных проблем.

Особенности решения задач геомеханики можно выделить в три основные группы [13, 14]:

- учет строения горного массива, характеризующегося наличием породных слоев существенно различающихся по механическим свойствам, пор, пустот, нескольких систем трещиноватости (или их отсутствия в некоторых слоях), поверхностей контакта слоев с разным сцеплением и силой трения и тому подобное;

- в процессе решения задачи приходится учитывать не только упруго-пластическое деформирование, но и так называемые стадии разупрочнения и разрыхления в определенных областях горного массива, т.е. для адекватного моделирования необходимо учитывать физическую нелинейность горной породы;

- геомеханические процессы в горном массиве зависят от реологических характеристик породных слоев, размеров и взаимного расположения горных выработок, изменения их параметров во времени и пространстве при ведении горных работ, т.е. геомеханические процессы нуждаются в построении динамической модели.

По приведенным причинам для решения задач геомеханики нужно получить следующую информацию:

- строение и механические свойства исследуемого слоистого горного массива;

- виды и величины механических воздействий, прилагаемых к определенным геометрическим областям породного массива и искусственным сооружениям;

- род задачи, подлежащей численному исследованию: распределение напряжений, деформаций, перемещений; разрушение некоторых участков породного массива, искусственных сооружений и тому подобное;

- геометрические, механические и силовые параметры подземных искусственных сооружений и их элементов.

На основе приведенных данных формируется расчетная схема, вид кото-

рой определяет выбор способа решения конкретной геомеханической задачи. Таким образом, составляется система математических уравнений, выражающих соотношение заданных и искомых величин, которая должна быть решена до получения конечного значения. К величайшему сожалению, в большинстве случаев нет возможности получить числовой результат, используя только аналитическое решение; в ряде задач приходится привлекать численные методы, которые предоставляют решение в пределах определенной погрешности [15-17]. Формирование расчетных схем для задач геомеханики связано с необходимостью учета большого количества нерегулярных параметров и сложных граничных условий; поэтому исследователи вынуждены упрощать постановку задачи с целью снижения размерности уравнений, описывающих систему, и функций, которые учитывают особенности начальной нагрузки и геометрии. Поскольку таким образом уже вносятся достаточная погрешность в расчетную схему, то становится довольно оправданным широкое применение численных методов в задачах механики горных пород.

На ранних стадиях развития численных методов считалась возможным получение для задач геомеханики только качественных результатов [14], но с развитием самих численных методов и представлений о напряженно-деформированном состоянии горного массива становится возможным получение не только адекватных качественных, но и в достаточной мере точных количественных результатов [13]. Разнообразие расчетных схем можно представить как комбинацию трех основных классов:

- геометрические признаки: понятия плоского или пространственного решения; наличие или отсутствие симметрии; использование односвязных двух- и многосвязных областей и тому подобное;
- внешние воздействия и механические свойства породного массива и инженерных конструкций: статическая или динамическая нагрузки; учет фильтрации жидкости и газа; учет колебания температур; изотропная, ортотропная или анизотропная среда; упругое, упруго-пластическое или вязко-пластическое деформирование массива без или с учетом его разупрочнения и разрыхления и тому подобное;
- конструктивно-технологические особенности крепления, охраны и функционирования выработок: конструктивно-технологическая схема сооружения выработок; последовательность ведения подготовительных и очистительных работ; характеристика выработок и способов их охраны; конструкция и режимы работы крепи.

Каждый класс расчетных схем порождает отдельный подход в формировании математической модели, а комбинация учитываемых факторов позволяет усложнять или упрощать решение. Поэтому исторически можно наблюдать картину поэтапного усложнения математических моделей геомеханических процессов, обусловленную ростом вычислительных мощностей с одной стороны, и усложнения условий эксплуатации подземных сооружений, с другой стороны. При решении задач геомеханики иногда используют так



называемые комбинированные численные методы. Одним из таких методов является МКЭ-МНП (метод конечных элементов-метод начальных параметров), что позволяет [13] легко учитывать технологические и конструктивные особенности крепи путем представления ее в виде стержневой системы определенной конфигурации. Такие элементы сочленяются с сеткой МКЭ горного массива в узлах, которые расположены на поверхности выработки. Этот подход позволяет в определенной мере упростить решение контактной задачи по поверхности контакта горного массива и крепи выработки.

В свое время широкое применение нашли аналитические методы, с помощью которых получали определенное математическое решение, дающее возможность предварительной оценки поведения горного массива при простых схемах нагружения без детального учета конструктивно-технологических особенностей функционирования геомеханической системы и в условиях однородной расчетной области. Несмотря на широкое развитие подобных методов, все они имеют общий недостаток – еще на этапе создания расчетной схемы необходимо принимать определенные упрощения, которые отрицательно отражаются на точности конечного результата. В итоге можно утверждать, что разнообразие аналитических решений и численных методов в задачах геомеханики продолжает расти и развиваться по пути усложнения конструктивно-технологических схем подземных сооружений, роста количества механических характеристик горных пород, которые учитываются в модели, и режимных параметров работы крепи и охранных элементов горных выработок.

## **2.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

### **2.2.1. ДИАЛЕКТИКА РАЗВИТИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ**

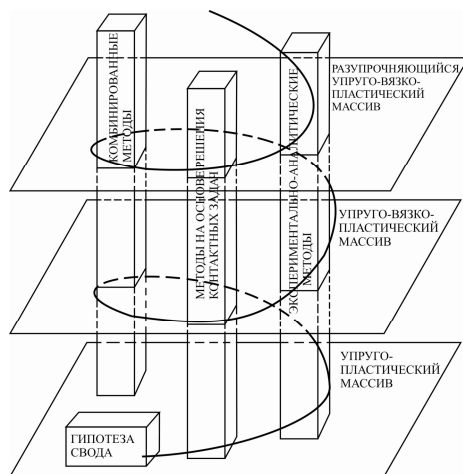
Исследования проявлений горного давления в горных выработках имеют уже более чем вековую историю и не теряют своей актуальности в настоящее время и на далекую перспективу развития подземного способа разработки месторождений полезных ископаемых. К основным проявлениям горного давления относят, как правило, два параметра, которые характеризуют две взаимосвязанные функции: распределение по контуру  $L_K$  выработки смещения  $U(L_K)$  пород и нагрузка  $P(L_K)$  на крепь. Связь этих функций определяет характеристику  $U(L_K) = \varphi[P(L_K)]$  породного массива вокруг выработки (предлагается назвать ее деформационно-силовой по аналогии с характеристикой работы крепи) и является основой для выбора рациональных способов и средств поддержания горных выработок. Поэтому целесообразно

но рассмотреть развитие методов расчета проявлений горного давления сквозь призму их подходов к определению деформационно-силовой характеристики массива.

Для наглядной иллюстрации на рис. 2.1 приведена общая схема диалектического развития большинства существующих методов расчета, которые объединены в три основные группы. Исходным пунктом в диалектической спирали является группа методов, объединенных под общим названием «гипотезы свода», которые положили основу систематическим исследованием проявлений горного давления [18-26]. Основные предпосылки различных гипотез свода состоят в следующем.

В результате сооружения выработки происходит процесс разупрочнения приконтурных пород с перераспределением нагрузки в глубь массива. Область разупрочненных пород вокруг выработки наделяется свойствами сыпучей среды и разделяется на две зоны по степени устойчивости: устойчивую, которая ограничена целостным массивом и сводом предельного равновесия, и неустойчивую, которая располагается внутри свода предельного равновесия и создает своим весом нагрузку на крепь. Граница свода предельного равновесия определяется исходя из разных предположений, которые базируются как на чисто гипотетических соображениях, так и на некоторых элементарных аналитических решениях и экспериментальных исследованиях. В связи с этим к числу преимуществ гипотез свода можно отнести крайнюю простоту метода определения нагрузки на крепь и минимально необходимую информацию о свойствах породного массива.

Принятые предположения предопределяют и слабые стороны гипотез свода: во-первых, недостаточная обоснованность основных положений и допущений, очень упрощенный подход к описанию геомеханических процессов, которые искажают их физическую сущность; во-вторых, уход от рассмотрения напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг выработки и его влияния на процессы создания зон предельного равновесия массива, развития смещений породного контура и нагрузки на крепь; в-третьих, крепь рассматривается как конструкция, которая выполняет только функции восприятия нагрузки от веса неустойчивых пород, и совсем игнорируются функции крепи относительно управления геомеханическими процессами в приконтурном породном массиве.



**Рис. 2.1. Схема диалектики развития методов расчета проявлений горного давления**

Совокупность указанных недостатков послужила толчком к развитию методов исследования напряженно-деформированного состояния массива вокруг горной выработки. Сначала эти методы базировались на решении упруго-пластических задач [27-36], а потом акцент был переведен на учет реологических свойств горных пород, их разупрочнения и разрыхления на стадии запредельного состояния [37-49]. Крепь рассматривается как жесткая конструкция с полным (по периметру) контактом с породным массивом, который совместно работает с ней. Нагрузка на крепь определяется из решений соответствующих разным схемам контактных задач. Эти методы уже позволяли определить деформационно-силовую характеристику породного массива. Тем не менее, большая степень идеализации расчетных схем, связанная с немалыми математическими трудностями решения соответствующих задач, привела к существенному несоответствию результатов расчета с натурными исследованиями, особенно, при определении нагрузки на крепь. Сложность учета разнообразных горно-геологических условий сооружения выработок и недостаточная информация о свойствах породного массива резко сузили область возможного применения данной группы методов прогноза горного давления.

Таким образом, возникла ситуация, когда методы расчета, основанные на решении контактных задач, позволили описать напряженно-деформированное состояние массива и определить смещения породного контура, но, в то же время, существенно искажали физическую сущность процесса формирования нагрузки на крепь. Эта ситуация привела к развитию комбинированных методов прогноза проявлений горного давления [27, 49-57], которые соединили два направления: исследование напряженно-деформированного состояния окружающего породного массива (определение смещений породного контура и размеров зоны неупругих деформаций); использование определенной гипотезы свода (определение нагрузки на крепь по размерам зоны неупругих деформаций). Эта группа методов стоит на более высокой ступени развития по отношению к гипотезам свода, так как базируется на решении задач геомеханики, но использование в качестве составляющей метода гипотезы свода приводит к соответствующим недостаткам.

Связующим и необходимым этапом развития методов расчета проявлений горного давления являются так называемые экспериментально-аналитические методы, в которых соединяются более общие аналитические решения с конкретными натурными исследованиями [58-63]. Эти методы успешно применяются для конкретной области проведения натурных исследований, но с расширением области и, тем более, механическим переносом результатов исследований на другие регионы снижается достоверность прогноза.

Одна из главных функций экспериментально-аналитического метода в диалектическом развитии методов прогноза проявлений горного давления заключается в связи методов, основанных на решении контактных задач (где определяются общие закономерности геомеханических процессов), через натурные исследования (проверяют и корректируют исходные предположки) с комбинированными методами (используют информацию о конкрет-

ных процессах проявлений горного давления) для создания комплекса расчетных схем, отражающих многообразие горно-геологических условий.

Таким образом, выделенные три группы методов тесно связаны между собой, являются логическим продолжением друг друга и с появлением новых знаний о свойствах пород (например, модели тел: упруго-пластическая, упруго-вязко-пластическая, упруго-вязко-пластическая с запредельной стадией деформирования и др.) диалектически развиваются, сменяя друг друга на более высоком этапе познаний по пути повышения надежности прогноза проявлений горного давления вокруг выработки.

### **2.2.2. РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА С КРЕПЬЮ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

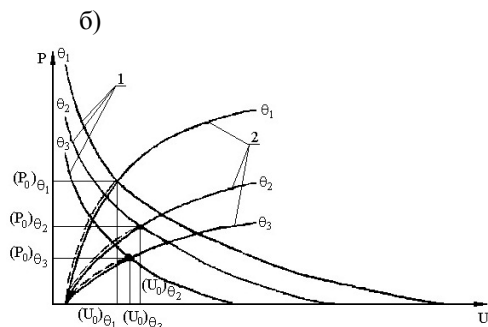
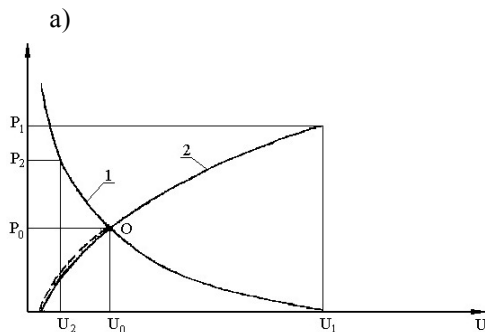
Геомеханические процессы, происходящие вокруг горной выработки, чрезвычайно разнообразны и многофакторны: с одной стороны, это изменение напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности выработки, которое формирует те или другие проявления горного давления, наблюдаемые на контуре выработки; с другой стороны, – это крепь горной выработки, которая имеет определенный режим работы и те или другие технические характеристики в соответствии со своими конструктивными особенностями. Обе стороны геомеханического процесса находятся в постоянном взаимодействии между собой в пространстве и времени, результат которого – определенная степень устойчивости горной выработки.

Исходя из этих позиций, во второй половине XX века начало развиваться направление геомеханики подземных сооружений, которое учитывает взаимосвязь и взаимовлияние параметров состояния породного массива и крепи друг на друга. Исследователями выделяются две закономерности, которые описывают процесс взаимодействия крепи с породным массивом. Первая – деформирование и нарушение целостности горных пород вокруг выработки, что проявляется в развитии смещений  $U$  породного контура и формировании нагрузки  $P$  на крепь. Определяющими факторами этого процесса являются разрыхление, разуплотнение частично или полностью нарушенных пород и, как следствие, увеличение их объема. Очевидное направление перемещения разуплотненного породного объема – это пустота выработки, поэтому при ограничении смещений пород за счет сопротивления крепи на ее контакте с породным контуром появляются напряжения, формирующие нагрузку на крепь. При возможности относительно свободного перемещения разуплотненного породного массива в полость выработки нагрузка на крепь резко падает. Поэтому податливая крепь испытает меньшую нагрузку по сравнению с жесткой, что нашло отображение в соответствующих аналитических моделях. Таким образом, первая закономерность связывает нагрузку на крепь  $P$  со смещением  $U$  породного контура, которое обусловлено раз-

рыхлением и разуплотнением нарушенных пород вокруг выработки. Ряд специалистов назвали функцию (2.1) деформационно-силовой характеристикой массива, которая представлена кривой 1 на рис. 2.2, а

$$P = \Phi_1(U). \quad (2.1)$$

Зависимость 1 обычно определяется аналитически из соответствующей задачи геомеханики, которая имеет ввиду предельно устойчивое состояние массива.



**Рис. 2.2.** Интегральный (а) и с разбивкой на участки контура выработки (б) подходы к оптимизации деформационно-силовых характеристик породного массива (—) и крепи (---): 1 — разупрочнение и разуплотнение массива; 2 — обрушение неустойчивых пород

нагрузка  $P$  на крепь, обусловленная весом неустойчивого породного объема. То есть, имеем другую зависимость величины нагрузки от смещения породного контура, который характеризуется кривой 2 на рис. 2.2, а

$$P = \Phi_2(U). \quad (2.2)$$

Рассматривая обе закономерности во взаимосвязи, исследователи пришли к следующим выводам. С одной стороны, по закономерности 1 с ростом смещений породного контура нагрузка на крепь падает и, если применить

Вторая закономерность характеризует процесс потери предельного равновесного состояния части нарушенных пород и их обрушение в полость выработки (кривая 2 на рис. 2.2, а). Нарушение предельного равновесия обусловлено рядом внешних воздействий, главным из которых является сила тяжести породного массива в зоне предельного равновесия.

Сущность этого процесса состоит в том, что нарушенные породы практически теряют сопротивление растягивающим и сдвигающим нагрузкам, поэтому в областях действия этих нагрузок равновесное состояние нарушенного массива теряется. Тенденция закономерностей 2 такова, что с ростом смещений  $U$  породного контура выработки увеличиваются размеры зоны нарушенных пород, находящихся в состоянии предельного равновесия и склонных к обрушению. Поэтому растет и нагрузка  $P$  на крепь, обусловленная весом неустойчивого породного объема.

крепь с величиной податливости  $U_1$ , то нагрузка на нее исчезает совсем (см. рис. 2.2, а). Но, с другой стороны, согласно закономерности 2 с ростом смещений  $U$  увеличивается нагрузка от веса пород обрушения, которая при  $U = U_1$  достигает величины  $P_1$ . В диаметрально противоположном случае резкого ограничения смещений породного контура  $U = U_2$  нагрузка от веса пород зоны обрушения мала, но при этом интенсивно возрастает нагрузка  $P = P_2$  за счет процесса разуплотнения и разрыхления нарушенных пород. При таком взаимно противоположном характере закономерностей 1 и 2 по уравнениям (2.1) и (2.2) всегда имеется оптимальное решение, которое характеризует минимум нагрузки  $P_0$  на крепь и соответствующую величину смещения  $U_0$  породного контура (см. рис. 2.2, а). Тогда довольно очевиден вывод о том, что рациональная конструкция крепи должна иметь деформационно-силовую характеристику  $q_K(U_K)$ , которая удовлетворяет двум условиям:

– во-первых, реакция крепи  $q_K$  на протяжении всей величины ее податливости  $U_K$  должна быть не меньшая нагрузка от веса пород зоны обрушения, то есть

$$q_K(U_K) \geq \Phi_2(U); \quad (2.3)$$

– во-вторых, деформационно-силовая характеристика крепи должна проходить не ниже точки  $O(P_0, U_0)$ , то есть

$$\left. \begin{aligned} q_{K_0} &\geq P_0; \\ U_{K_0} &= U_0. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

По такому принципу построено большинство исследований относительно оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом, которые не противоречат результатам шахтных наблюдений. Предоставленная схема оптимизации логична, достаточно проста, но далеко не всесторонняя, на что указывают те же результаты шахтных исследований проявлений горного давления. Они настолько многочисленны, что делать ссылку на отдельные из них нет смысла, а в качестве примера приведем нормативный документ [64], который является интегральным результатом обобщения исследований. Считается установленным, что величина смещений  $U$  породного контура изменяется по периметру  $r_e(\theta)$  выработки, то есть

$$U = U(\theta), \quad (2.5)$$

где  $r_e$  и  $\theta$  – полярные координаты контура выработки в поперечном сечении.

Например, смещение боков выработки, как правило, существенно отличаются от величины смещений кровли или почвы. Но смещение любой части

породного контура является интегральной характеристикой процессов разупрочнения и разрыхления породного массива в данном направлении. Итак, каждый участок контура выработки характеризует своя зависимость  $P(U)$  по уравнению (1.1), которое можно сейчас представить в виде

$$P(\theta) = \Phi_1[U(\theta)]. \quad (2.6)$$

Тогда на схеме оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом будем иметь набор кривых 1, каждая из которых характеризует свой участок породного контура выработки (рис. 2.2, б).

При разной величине смещений породного контура  $U(\theta)$  на отдельных участках периметра выработки будет иметь место разная степень разуплотнения и разупрочнения массива и переменная глубина зоны предельного равновесия. Кроме того, разное направление смещений по отношению к направлению действия сил тяжести предопределяет разную глубину контура пород зоны обрушения и разную величину нагрузки на крепь. Поэтому нужно вести речь о функции распределения нагрузки  $P(\theta)$  по периметру поперечного сечения выработки, которая определяется весом пород зоны обрушения

$$P(\theta) = \Phi_2[U(\theta)] \quad (2.7)$$

Таким образом, процесс обрушения неустойчивых пород также представлен рядом кривых 2 (см. рис. 2.2, б). Тогда оптимальная деформационно-силовая характеристика крепи будет представлена группой условий

$$\left. \begin{aligned} (q_K)_{\theta_i} [U_K]_{\theta_i} &\geq \Phi_2(\theta_i); \\ (q_K)_{\theta_i} &\geq (P_0)_{\theta_i}; \\ (U_K)_{\theta_i} &= (U_0)_{\theta_i} \text{ при } i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Такой подход к оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом предложен в работе [65], где периметр выработки распределяется на три участка: кровля, бока и почва.

Логическое развитие подхода [65] получено в работе [66], где деформационно-силовая характеристика массива по формулам (2.6) и (2.7) непосредственно начала рассматриваться как функция периметра породного контура (рис. 2.3).

Таким образом, окончательно осуществлен переход от оптимизационной схемы двухпараметрической (в координатах нагрузка  $P$  – смещение  $U$  породного контура) к трехпараметрической схеме, где параметры  $P$  и  $U$  рассматриваются как функции периметра (угловая координата  $\theta$ ) породного контура, которая более достоверно отражает реальную картину проявлений горного давления в выработке по данным шахтных инструментальных наблюдений. Тогда деформационно-силовые характеристики породного мас-

сива и крепи в трехпараметрической схеме оптимизации представлены соответствующими поверхностями в координатах  $P$ ,  $U$ ,  $\theta$  (см. рис. 2.3). Пересечение поверхностей 1 и 2 дают уже не оптимальную точку  $(P_0, U_0)$  как в двухпараметрической схеме, а оптимальную функцию

$$P_0(\theta) = \Phi_0[U_0(\theta)], \quad (2.9)$$

проекция которой на плоскости  $P\theta$  и  $U\theta$  определяют оптимальные эпюры распределения нагрузки  $P_0(\theta)$  и смещения  $U_0(\theta)$  породного контура. Согласно критерию формирования минимальной нагрузки на крепь ее деформационно-силовая характеристика должна пройти через кривую по функции (2.9) или немного выше ее:

$$\left. \begin{aligned} q_K[U_K(\theta)] &\geq \Phi_2[U_0(\theta)]_F \\ q_{K_0}(\theta) &\geq P_0(\theta); \\ U_{K_0}(\theta) &= U_0(\theta). \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Дальнейшие шаги в развитии подходов к оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом представляются как довольно очевидными, так и весьма актуальными по следующим соображениям. Опыт эксплуатации горных выработок и инструментальные шахтные наблюдения убедительно свидетельствуют, что проявления горного давления имеют неравномерный характер распределения по длине (координата  $Z$ ) выработки. Обобщая многочисленные результаты исследований в этом направлении, можно выделить три основных фактора, которые обуславливают ту или другую степень неравномерности проявлений горного давления (эпюры нагрузки  $P(Z)$  и смещений  $U(Z)$  породного контура) по длине выработки.

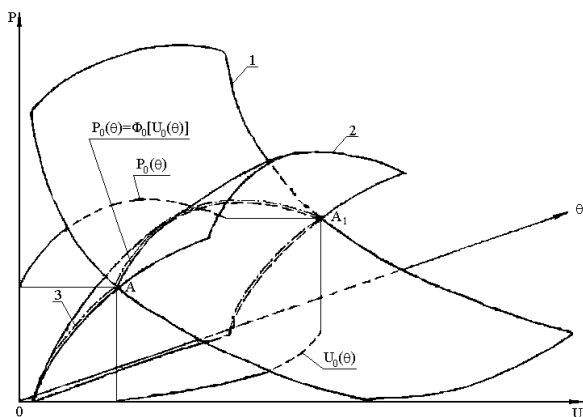


Рис. 2.3. Трехпараметрическая схема оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом: 1 – разупрочнение и разуплотнение массива; 2 – неустойчивое равновесное состояние; 3 – деформационно-силовая характеристика крепи



*Первый фактор* – неоднородность механических свойств породного массива по длине выработки, которая имеет место практически в любых горно-геологических условиях ее сооружения. Это проявляется в колебаниях нагрузки  $P(Z)$  и смещений  $U(Z)$  породного контура, имеющих преимущественно стохастический характер по длине выработки, что обусловило разработку ряда вероятных методов прогноза проявлений горного давления.

*Второй фактор* заключается в неоднородности геометрических, механических и силовых параметров крепей в продольном направлении выработки, ведь большинство конструкций крепей являются пространственными. Так рамные, металлобетонные, анкерные, рамно-анкерные, с тампонажем закрепного просторную, набрызгбетонные, тубинговые и некоторые другие типы крепей имеют колебания по длине выработки геометрических, механических и силовых параметров. Тогда имеем неоднородность по осевой координате  $Z$  выработки деформационно-силовой характеристики крепи.

*Третий фактор* обусловлен взаимосвязью и взаимовлиянием деформационно-силовой характеристики крепи и деформационно-силовой характеристики породного массива, отражающий процесс формирования зоны обрушения пород вокруг выработки, который был обоснован аналитически и подтвержден на моделях из эквивалентных материалов в работе [66]. Поэтому неравномерность деформационно-силовой характеристики крепи по осевой координате  $Z$  выработки вызывает неравномерность деформационно-силовой характеристики процесса обрушения (см. рис. 2.3, поверхность 2) пород вдоль выработки. Этот фактор нужно обязательно учитывать, поскольку минимальная реакция крепи в любом сечении выработки генерирует в этом сечении максимальную нагрузку от веса пород зоны обрушения. Поэтому оптимизация режимов взаимодействия крепи с породным массивом должна проводиться в пространственной постановке, то есть, не только в поперечном, но и в продольном направлениях выработки. В связи с этим деформационно-силовые характеристики породного массива и крепи рассматриваются как функции, которые изменяются по поверхности  $r_e(\theta, Z)$  контакта «массив-крепь»

$$\left. \begin{aligned} P(\theta, Z) &= \Phi_1[U(\theta, Z)] \\ P(\theta, Z) &= \Phi_2[U(\theta, Z)] \\ q_K(\theta, Z) &= \Psi[U_K(\theta, Z)] \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Пространственная оптимизация режимов взаимодействия крепи с породным массивом предусматривает четырехпараметрическую схему (параметры  $P, U, \theta, Z$ ), графическая интерпретация которой приведена на рис. 2.4. Стохастический характер изменения механических свойств массива вдоль выработки предполагает ряд поверхностей 1 для разных координат  $Z_i$  сечений выработки в соответствии с первым уравнением системы (2.11). Деформационно-силовая характеристика процесса формирования зоны обрушения, которую описывает второе уравнение системы (2.11), также пере-

менная по осевой координате  $Z$  и потому на схеме также должна быть представлена рядом поверхностей 2 (см. рис. 2.4).

Очевидно, что линии пересечения ( $AA_1$ ,  $BB_1$  и т.д.)

$$P_0(\theta, Z) = \Phi_0[U_0(\theta, Z)] \quad (2.12)$$

поверхностей 1 и 2 будут изменяться в каждом сечении  $Z_i$  выработки. Семейство этих линий определяют поверхность  $AA_1B_1B$  по уравнению (2.12) из условия

$$\Phi_1[U(\theta, Z)] = \Phi_2[U(\theta, Z)], \quad (2.13)$$

которое отражает оптимальную деформационно-силовую характеристику крепи.

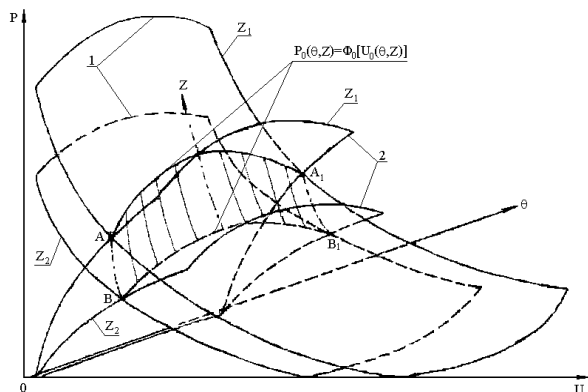


Рис. 2.4. Четырехпараметрическая схема оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом

Данная четырехпараметрическая схема оптимизации режимов взаимодействия крепи с породным массивом предложена в работе [67] и ее реализация предусматривает ряд решений задач по определению, как минимум, второго и третьего уравнений системы (2.11). То есть, осуществлен переход к аналитическому решению задач в пространственной постановке, относительно расчета геомеханических параметров взаимодействия и отражения конструктивных параметров крепи. Но аналитическое решение пространственных задач, потребность в которых вызвана велением времени, обуславливает непреодолимые трудности, что обосновывает большие перспективы применения численных методов.

### 2.3. ТЕНДЕНЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ МКЭ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В процессе решения задач геомеханики постоянно приходится сталкиваться с проблемой расчета систем, которые имеют сложную геометрическую конфигурацию и нерегулярную физическую структуру. Горный массив имеет большое количество характеристик своей структуры и свойств, учет которых при математическом моделировании возможен только при использовании конечно-разностных схем расчетов; в настоящее время стандартом де-факто при решении геомеханических задач является метод конечных элементов.

С конца 60-х и к середине 80-х годов XX века выполнены обширные исследования советскими учеными-механиками (в первую очередь необходимо отметить работы О.К. Зенкевича, Б.З. Амусина, Ж.С. Ержанова, В.Ю. Изаксона, Ю.М. Либермана, А.Ф. Фадеева, Е.Г. Морозова и др.), которые заложили основу методологии применения МКЭ к решению задач геомеханики в упругой и упруго-пластической постановке. В этот период основной проблемой, которая мешала широкому применению МКЭ в геомеханике, было несоответствие между сложностью математических моделей и вычислительными мощностями компьютеров.

Основы методологии решения МКЭ большого количества разнообразных задач изложены в работе [68]. Для решения физически нелинейных задач было предложено три варианта метода приращения: переменной жесткости, начальных напряжений и начальных деформаций. Использование того или другого метода для расчета конкретной задачи обусловлено особенностями схемы нагружения, поведения материалов и комбинацией граничных условий.

Одной из фундаментальных работ в области применения МКЭ в задачах геомеханики является публикация [69]. Авторы рассмотрели большой диапазон особенностей, которые присущи горному массиву, в контексте математического описания для использования с уже существующим математическим аппаратом МКЭ. В частности, рассматриваются особенности расчета трансверсальноизотропного тела с учетом слоистости массива: показывается, как на основе обобщенного закона Гука строится матрица жесткости отдельного элемента, а потом приводится решение для всей системы плоских треугольных элементов. Также рассмотрены методы определения полей напряжений и деформаций в неоднородных средах с учетом взаимодействия крепи с окружающим массивом. Дальше авторами показана методика решения упруго-пластической задачи на основе экспериментальной билинейной зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций. Решение получено в обобщенной трехмерной постановке без учета структурной неоднородности горного массива. Относительно получения численных значений использовался метод переменных параметров упругости. Показано, как на основе расчета интенсивности напряжений в упругой постановке выполняется поиск модулей упругости, что позволяет выполнять следующий итерационный расчет. Последовательность таких расчетов при

переменных модулях упругости в комбинации с приростом нагрузки, действующей на систему, дает возможность решать упруго-пластические задачи с учетом ниспадающей ветви полной диаграммы деформирования горной породы. Тем не менее, при таком подходе остается неясным, насколько адекватны получаемые результаты реальным явлениям.

В работе [70] значительное внимание уделено учету неоднородности физико-механических показателей породных слоев, слагающих горный массив. Осуществлена классификация математических моделей пород по их прочностным характеристикам: породы разделены на три основные группы: слабые, средней крепости и крепкие, а также показана методика интегрирования математических моделей пород в расчетную схему метода конечных элементов. Особенно нужно выделить решение задачи определения НДС горного массива с учетом полной диаграммы «напряжение-деформация»: предложенная автором методика поиска решения с помощью метода фиктивных усилий хорошо согласуется с энергетическими представлениями о равновесии сплошной среды в запредельном состоянии. Решение в таком виде хотя и не дает полной определенности результатов, но значительно снижает зависимость точности решения от факторов, отражающих исходную модель. До сих пор данный подход рассматривается как наиболее приемлемый для решения задач, учитывающих поведение материала за границей прочности.

На основе указанных работ коллектив авторов создал и успешно использует вычислительный программный комплекс «Геомеханика» [71], который с достаточно высокой степенью достоверности позволяет решать следующие прикладные задачи геомеханики в плоской и осесимметричной постановках:

- определение упруго-пластического НДС;
- консолидация водонасыщенного грунта;
- стационарные и нестационарные температурные задачи, напорной и безнапорной фильтрации;
- оценка сейсмостойкости сооружений.

Тем не менее, комплекс не позволяет решать контактные задачи сложной конфигурации в пространственной постановке и имеет малый набор математических моделей пород, которые используются в расчетах. Это в определенной мере суживает круг задач, решение которых потенциально возможно с помощью данного программного продукта.

В работе [72] рассмотрены аспекты применения МКЭ для расчетов геомеханических явлений с низким внутренним трением, в частности, приведено решение задачи деформирования обрушенных пород. Расчетная модель задачи может быть только пространственной, поскольку необходимо учитывать специфику поведения разрушенного материала, размеры кусков которого влияют на угол внутреннего трения породы.

Математическое моделирование методом конечных элементов процесса зарождения зоны разрушения пород вблизи выработки и закономерности ее формирования выполнено в работе [73]. Моделирование поведения пород-

ного массива в зоне влияния забоя обеспечено заменой пространственной задачи рядом последовательно решаемых плоских задач, где начальные и граничные условия на каждом шаге задаются исходя из результатов решения предыдущего.

Методика, позволяющая избежать итерационного процесса при решении нелинейной задачи геомеханики, приведена в работе [74], где разработана процедура объединения методов переменных параметров упругости и начальных деформаций. В основу процедуры положен принцип Родина в конечно-элементной интерпретации, который позволяет определить дополнительные техногенные перемещения путем изменения области исходного поля перемещений. Решение выполняется с применением кусочно-линейной диаграммы «напряжение-деформация», которая характеризуется модулем упругости, пределом прочности на сжатие, модулем спада и остаточной прочностью породы. Достоинство данного подхода заключается в соединении простоты расчетов и возможности учета сложного реологического поведения горного массива.

Комбинированный метод расчета НДС горного массива разработан на основе совместного использования группы конечно-разностных методов [75]. Сущность предложенной методики расчета состоит в следующем: на первом этапе определяется область влияния выработки на окружающий горный массив одним из численных методов (МКЭ или граничных элементов) в упругой постановке. Затем в данной области определяется граница зоны разупрочнения массива в соответствии с избранным критерием прочности. В пределах этой зоны поведение породы описывается определенными соотношениями разупрочненной породы; поведение разрушенного материала анализируется с помощью метода дискретных элементов. Предложенная методика расширяет возможности расчета горных массивов в нелинейной постановке, но авторы не приводят математическую формулировку задачи, которая обеспечивает переход из одной конечно-разностной модели в другую; в частности, остается не раскрытой одна из ключевых проблем – определение граничных условий на площадках контакта отдельных конечно-разностных схем.

Для массива, ослабленного несколькими системами трещин, создана методика [76], в которой математическая модель прочности материала учитывает влияние угла наклона системы трещин. Предложенная модель позволяет наглядно и с достаточной степенью точности оценить НДС трещиноватого массива.

В работах [77, 78] рассмотрены аспекты моделирования объемного предельного состояния породного массива при подземной отработке свиты угольных пластов, где учитываются угол внутреннего трения пород, угол падения пластов и физико-механические характеристики отдельных породных слоев. В качестве критерия потери прочности используется обобщенный критерий Кулона-Мизеса, который позволяет существенно упростить процедуру определения границ зоны нарушенных пород. Затем для элементов,

которые попали в зону разупрочнения, рассчитывается коэффициент остаточной прочности породы, используемый в дальнейшем для определения параметров роста зон разупрочненных и разрушенных пород. К сожалению, автор не учитывает взаимное проскальзывание слоев пород, считает модель горного массива невесомой и не определяет перемещений пород с помощью МКЭ, а также в расчетах не учитываются особенности взаимодействия крепи с горным массивом.

Таким образом, краткий обзор существующих исследований убедительно доказывает, что использование МКЭ при решении задач геомеханики находит все более широкий диапазон применения: постоянно совершенствуется и усложняется методика проведения расчетов; решение объемной задачи геомеханики в упруго-пластической постановке стало нормой; во многих случаях исследователи учитывают большое количество факторов и их комбинации, присущие характеристикам локальных возмущений системы. В целом, развитие математических моделей направлено на поиск доступной точности расчетов, проводимых по классическим методикам, но учитывающих максимально возможное число факторов.

По результатам анализа работ, посвященных конечно-разностному моделированию геомеханических процессов вокруг подземных выработок, четко прослеживаются следующие тенденции:

- *во-первых*, наиболее широко используется метод конечных элементов, который имеет универсальные возможности; тем не менее, при решении сложных геомеханических задач, которые одновременно рассматривают многофакторность механических свойств пород, неоднородность структуры окружающего массива и геометрических параметров объекта, возможна комбинация МКЭ, МГЭ и МДЭ для получения более достоверного решения; основная сложность применения такой комбинации заключается в объективном отображении физической сущности процесса на границах соединения элементов модели, которая исследуется группой конечно-разностных методов;

- *во-вторых*, большинство задач нуждается в пространственной постановке для более достоверного отображения геомеханических процессов, которые и наблюдаются на современном этапе изучения состояния горных массивов;

- *в-третьих*, все большее количество работ посвящается учету неоднородности механических характеристик массива и его структуры, которая очень существенно влияет на результаты расчетов НДС геомеханической системы;

- *в-четвертых*, постоянно растет количество работ, учитывающих не только пластические и реологические свойства горных пород, но и полную диаграмму их деформирования (допредельное и запредельное состояние), что приближает геомеханическую модель к реальному объекту.

В этом смысле можно выделить три основные группы факторов, которые влияют на развитие методики применения МКЭ в задачах геомеханики:

- описание физико-механических характеристик пород – постоянно усложняется и пополняется новыми параметрами модель состояния породы, особенностей ее структуры и геологических нарушений;

- анализ технологических факторов строительства и эксплуатации подземных сооружений – разработка новых методик использования начальных и граничных условий, применяемых в геомеханической модели;

- корректирование теорий прочности и пластичности, используемых при компьютерном моделировании – особенности конечно-разностной схемы позволяют модернизировать условия возникновения и развития зон предельного и запредельного состояния породы.

В итоге можно утверждать, что разнообразие полученных решений доказывает достаточную степень универсальности МКЭ для моделирования геомеханических процессов и перспективы развития данного метода расчета.

## ВЫВОДЫ

Геомеханические системы, исследуемые человечеством свыше ста лет, характеризуются сложной и многофакторной структурой, которая, с диалектической точки зрения, не может быть идеально смоделирована раз и навсегда. Постоянно появляются новые знания о свойствах и поведении горного массива, а развитие промышленности, в том числе и горнодобывающей, расширяет разнообразие задач практики.

Любая геомеханическая система отличается нерегулярной структурой, геологическими нарушениями, неоднородностью механических и силовых параметров, сложной геометрией. Поэтому известные геомеханические модели развивались и совершенствовались постепенно по пути более достоверного отображения процессов в горном массиве. Аналитические методы расчета проявлений горного давления в своем диалектическом развитии приблизились к уровню, когда решение сложной системы уравнений уже невозможно получить аналитически и предопределяет необходимость применения вычислительной техники. Но речь не идет о банкротстве аналитических методов: их относительная простота обуславливает целесообразность использования в определенных условиях эксплуатации подземных сооружений, а методы оптимизации режимов взаимодействия крепи с горным массивом должны быть введены в технологию компьютерного моделирования. Тем не менее, не подлежит сомнению перспективность развития технологий компьютерного моделирования геомеханических процессов, где наиболее распространенным методом является метод конечных элементов. Большое будущее этого направления обуславливает постоянный рост мощности вычислительной техники и усовершенствование программного обеспечения. Поэтому, современный горный инженер должен владеть рядом знаний и приемов относительно компьютерного моделирования геомеханических процессов вокруг подземных сооружений различного назначения.

### 3. МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МКЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 3.1. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Обычно, выделяют следующие основные факторы при проведении вычислительного эксперимента в задачах геомеханики с применением МКЭ, которые обязательно нуждаются в уточнении для обеспечения адекватности расчетных моделей:

- размер и форма области, исследуемой в модели;
- характер начальных условий;
- характер и величина граничных условий;
- метод описания элементов крепи;
- определение диапазона колебаний физико-механических характеристик пород, которые используются при моделировании горного массива.

Размер и форма области твердотельного моделирования горного массива вокруг выработки влияет на размерность решаемых задач и на форму целевой функции, которая задает распределение перемещений по всей расчетной области. Для выработок, которые пройдены с малым углом наклона к горизонтам, на основе тестовых расчетов в качестве базовой формы расчетной области избран параллелепипед, имеющий следующие параметры:

- верхняя и нижняя грани сориентированы параллельно почве выработки и отстоят от ее оси на длину не менее, как в десять радиусов окружности, описанной вокруг контура выработки;

- боковые грани сориентированы вдоль оси выработки, отстоят от ее оси на длину не менее, как в семь радиусов окружности, описанной вокруг контура выработки;

- боковые грани, пересекающие ось выработки, располагаются одна от другой на расстоянии, которое определяется из характеристик крепи выработки, моделируемой в вычислительном эксперименте.

Параллелепипед в качестве базовой формы области расчетов позволяет наиболее просто приложить начальные и граничные условия, которые хорошо согласовываются с реальными условиями нагружения горного массива. Формы шара или круга определенной толщины вообще не применяются в задачах геомеханики в связи с большими трудностями наложения граничных условий методом МКЭ. Правда, для расчета вертикальных стволов хорошо подходит толстостенный цилиндр в качестве формы расчетной области. Эта форма наиболее оптимальна для минимизации размерности задачи, но не позволяет реализовать в полном объеме классическую расчетную схему задач геомеханики.

Выбор размеров параллелепипеда обусловлен оптимизацией размерности основных матриц МКЭ, что особенно важно при решении задач геомеханики в упруго-пластической постановке. Увеличение линейных размеров по-



зволило бы свести к нулю влияние на результат расчетов граничных условий, но при этом катастрофически сокращается величина доступных вычислительных ресурсов, что в конечном итоге приводит, как правило, к отказу вычислительного алгоритма.

Вторым важным фактором, подлежащим дополнительному анализу, является определение параметров начальных условий. Начальные условия могут существенно влиять на результаты вычислительного эксперимента при решении задач в упруго-пластической постановке и с учетом реологических свойств породного массива. Одним из наиболее значащих начальных условий является форма функции приложения нагрузки во времени. Эта функция может быть определена только на основе натурных наблюдений или лабораторных исследований для конкретных горно-геологических условий. Тестовые расчеты для разных форм функции показали ее существенное влияние на формирование в горном массиве зон разупрочнения: это влияние сказывается как на изменении формы зоны разупрочнения, так и на вариациях максимумов напряжений в горном массиве.

Третьим фактором, который чувствительно влияет на картину распределения напряжений при упруго-пластической постановке задачи, является выбор теории пластичности, используемой для описания предельного и за-предельного поведения материала. Анализ тестовых расчетов показал, что при выборе критериев Мизеса и Треска для относительно сложного НДС порог перехода породы в запредельное состояние на 10...12% выше, чем при выборе критерия Друкера-Прагера, но при этом рост перемещений контура выработки имеет более пологий вид и повышенную величину на отдельных участках контура. Однако, вычислительная устойчивость расчетной модели, которая использует критерий Мизеса, намного выше, чем для критериев Треска и Друкера-Прагера. Поэтому указанный показатель должен проходить этап оптимизации при каждом, даже незначительном изменении расчетной модели, поскольку возможные погрешности вычислений могут приводить к срыву итерационного процесса по причине невозможности определения целевой функции на всем пространстве модели.

При выборе граничных условий их разделяют на две основные группы – *пассивные* и *активные*. В задачах геомеханики в качестве пассивных используют симметрию, мягкое основание, шарниры и жесткое основание. В качестве активных граничных условий используют давление (распределенная нагрузка), силу тяжести и очень редко сосредоточенное усилие. Пассивные граничные условия имеют качество постоянности и не изменяются в ходе выполнения расчетов. Активные, наоборот, могут изменять как величину, так и характер. В частности, при решении задачи в упруго-пластической постановке нагружение расчетной области происходит по линейному закону от нуля до приведенной единицы.

В случае, когда рассматривается выработка, пройденная под малым углом к горизонтالي, наиболее оптимальной комбинацией граничных условий можно считать следующую: на вертикальные грани параллелепипеда на-

кладывается симметрия; основание жестко фиксируется, что предопределяет высокую устойчивость вычислительного процесса; к верхней грани прикладывается равномерно распределенная нагрузка (если выработка находится вне зоны влияния очистных работ) или нагрузка, распределение которой задается сложным образом (если необходимо учитывать влияние очистных работ).

Использование граничного условия «мягкое основание» считается малоэффективным, особенно при проведении расчетов в упруго-пластической постановке, поскольку сложность расчетов и время их проведения увеличивается в разы, что в свою очередь, снижает надежность окончательных результатов. С другой стороны, эффект демпфера может быть достигнут простой комбинацией жесткого основания и двух-трех слоев конечных элементов, которые примыкают к основанию и имеют повышенную деформируемость, что немного увеличивает размерность задачи, но не усложняет сам вычислительный процесс.

Широкое применение в расчетных схемах граничного условия «симметрия» обусловлено как самим типом геомеханической задачи, так и высоким уровнем универсальности этого граничного условия: ее важной особенностью является малое влияние на формы целевой функции и высокая скорость выравнивания возмущений, которые добавляются таким граничным условием в расчетную схему.

Именно влиянием граничных условий на форму целевой функции обусловлен рост расстояния между вертикальными гранями расчетной области, которые расположены перпендикулярно оси выработки. Для получения наиболее адекватного результата в среднем сечении расчетной области необходимо смоделировать выработку, которая вмещает по длине не менее трех рам крепи. При этом грани расчетной схемы необходимо располагать таким образом, чтобы они разделяли пополам основные элементы крепи (например, для рамной крепи грань должна проходить сквозь ось симметрии профиля рамы, а для анкерного – сквозь ось симметрии анкера).

В ходе проведения тестовых расчетов было показано, что для пространственной модели с относительно малой расчетной сеткой критически важно обеспечить высокую детализацию элементов крепи выработки. Этот вывод сделан на основе анализа ряда расчетных моделей, где крепь выработки моделировалось с разной степенью адекватности – от моделирования в виде распределенного давления на контуре выработки к точному отображению всех конструктивных элементов. Оптимальным нужно считать подход точного моделирования элементов крепи, которые имеют минимальный геометрический размер больший, чем 15 минимальных размеров конечных элементов, используемых в расчете.

Важным фактором при моделировании крепи выработки является определение условий ее контакта с поверхностью породного массива. Поскольку в большинстве расчетных схем материал крепи имеет более высокие механические характеристики, чем породный массив, на площадках контакта

крепей и пород возникает высокий градиент перемещений. Для повышения адекватности расчетной схемы в этом случае приходится использовать методику вычисления изменения поверхности контакта. Это не только повышает размерность задачи (число узлов на поверхности контакта удваивается), но и приводит к значительным вычислительным затратам. Поэтому, с одной стороны, необходимо очень осторожно использовать данный подход, а с другой – применять его повсюду в задачах геомеханики, где ожидаются большие перемещения узлов по контуру выработки.

Определение набора физико-механических характеристик породного массива, используемых при моделировании, зависит от типа задачи и наличия соответствующих показателей, которые получены в ходе натурных и лабораторных исследований. Анализ расчетов, проведенных для разных вариантов учета прочностных характеристик пород, свидетельствует о следующем: ортотропность значительно влияет на распределение горизонтальных напряжений, ее учет приводит к росту перемещений по контуру выработки; учет полной диаграммы «напряжение-деформация» позволяет наиболее адекватно отобразить процесс деформирования приконтурных пород с появлением областей предельного и запредельного состояния; учет температурных характеристик мало влияет на поле напряжений и деформаций; учет реологических свойств пород позволяет получить полные перемещения на контуре выработки в любой период времени ее эксплуатации.

Таким образом, получение надежных, качественно и количественно адекватных результатов вычислительного эксперимента задач геомеханики возможно только при комплексном учете широкого спектра характеристик математической модели, ряд которых должен проходить оптимизацию для каждой серии расчетов и обеспечивать сходимость вычислений с малой погрешностью.

### **3.2. АЛГОРИТМ ПОСТАНОВКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Процесс актуализации расчетной схемы вычислительного эксперимента представлен в виде блок-схемы (рис. 3.1) и состоит из трех основных этапов, которые непосредственно предшествуют выполнению вычислительного эксперимента:

- создание геометрических объектов;
- привязка физико-механических характеристик материалов к элементам модели;
- оптимизация расчетной модели.

Рассмотрим подробно процедуру создания геометрических объектов. Сначала параллельно создаются модели элементов крепи и породных слоев, которые будут использоваться при составлении модели горного массива. Вид элементов крепи и их качественная составляющая в расчетной схеме

зависит от выбора метода решения задачи (в линейной или нелинейной постановке), оценки продольной составляющей НДС и степенью необходимой точности результатов в приконтурной к выработке зоне горных пород.

Процесс создания моделей породных слоев основан на выборе глобальных условий контакта между поверхностями разных геометрических элементов расчетной схемы. Если модель горного массива состоит из нескольких модельных слоев (их число может превышать число породных слоев) приходится делать так называемую сборку горного массива. Сборка представляет процесс построения пространственной модели, которая описывает горно-геологические условия вокруг выработки и устанавливает границы расчетной зоны конкретной задачи. В случае рассмотрения однородной модели горного массива этап сборки не нужен и исследователь переходит непосредственно к формированию контура выработки.



Рис. 3.1. Блок-схема вычислительного эксперимента

Формирование контура выработки согласовывается с условиями установки элементов крепи. Одновременно выполняется привязка выработок и их сопряжений к структуре горного массива. Нужно заметить, что структурно-логические ошибки, которые могут возникнуть при формировании контура

выработки, приводят к невозможности правильного сопряжения поверхностей элементов крепи и горного массива. В конце первого этапа следует соединить элементы крепи с контуром выработки. Этот этап достаточно трудоемкий и в значительной степени является определяющим при решении задач с изменяющейся поверхностью контакта. Если в расчетах не планируется использование элементов крепи (как частей расчетной схемы), то блоки «Элементы крепи» и «Установка крепи в выработке» не выполняются.

Второй этап актуализации расчетной схемы не имеет ярко выраженной структуризации и представляет собой две операции, которые постоянно повторяются – формирование библиотечных модулей описания свойств материалов и привязка свойств материалов к конкретным элементам расчетной схемы. На этом этапе определяется тип задачи (линейная, нелинейная и тому подобное), на основе которого будет проводиться вычислительный эксперимент. Если при оптимизации расчетной схемы возникнет необходимость изменить тип задачи, то придется повторно разрабатывать библиотеки материалов и выполнить привязку их свойств к элементам расчетной схемы.

Наиболее трудоемкий и требующий высокого уровня профессиональной подготовки этап – оптимизация расчетной схемы. Он включает три взаимосвязанных шага, каждый из которых реализует постоянный алгоритм действия, применяемый к разным показателям расчетной схемы. Сущность данного алгоритма состоит в следующем: задаются конкретные значения показателей (для первой итерации выбираем значение исходя из предыдущего опыта); выполняем тестовый расчет – если результат расчета удовлетворительный, проводим оптимизацию следующей группы параметров; при неудовлетворительном результате выполняем дополнительный анализ полученных данных и на его основе выбираем новые значения показателей; возвращаемся к началу цикла.

Оптимизация внешних размеров модели заключается в выборе таких значений высоты, ширины и глубины, при которых влияние граничных условий на результат вычислительного эксперимента минимизируется с одной стороны, а с другой – минимизируется шаг приращения при определении расчетных точек. Схема нагружения и условия контакта элементов модели оптимизируются по критерию снижения локальных возмущений, которые появляются в областях сопряжений элементов модели и поверхностей, воспринимающих внешние нагрузки.

В итоге, созданная расчетная схема, которая полностью или по главным факторам удовлетворяет условиям постановки задачи, используется как основа вычислительного эксперимента. Любые изменения расчетной модели (в процессе проведения вычислительного эксперимента) находятся в пределах работ по ее актуализации и имеют частный характер, который обусловлен особенностями конкретного вычислительного эксперимента. В случае, когда вычислительный эксперимент невозможно выполнить в полном объеме по существующей расчетной схеме, она рассматривается как неадекватная и нуждается в повторной актуализации.

### 3.3. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС СЛОИСТОГО МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ

В основе проведения любого исследования положена следующая общелогическая структура:

- разработка и оптимизация расчетной модели вычислительного эксперимента;
- первичное тестирование расчетной модели для разных показателей физико-механических свойств ее элементов;
- выполнение последовательности основных вычислительных экспериментов;
- первичная подготовка полученных данных, которая состоит в определении объемных эпюр напряжений и деформаций основных элементов расчетной модели;
- статистическая обработка и определение критически важных показателей результатов расчетов;
- формирование технологических критериев, по которым определяются рациональные показатели крепи и поддержания горной выработки.

Общеизвестно, что при выполнении расчетов МКЭ в задачах геомеханики применяют два вида расчетных моделей: плоская и пространственная. Мы делаем выбор в пользу пространственной модели, так как она имеет ряд преимуществ в сравнении с плоской моделью:

- позволяет учитывать неоднородность породного массива в двух перпендикулярных вертикальных плоскостях;
- максимально точно отображает условия контакта между элементами крепи выработки и горным массивом;
- позволяет в полной мере реализовать в расчетах все возможные механические характеристики реальных объектов;
- дает возможность адекватного моделирования пространственной конструкции крепи.

Таким образом, использование пространственной расчетной модели минимизирует возможности исследователя на внесение вынужденных погрешностей в результаты расчетов. Например, в ряде публикаций относительно исследований поведения горного массива вблизи выработки указывается на то, что учет силы трения между породными слоями не имеет смысла. Этот вывод часто делается авторами, которые исследовали плоскую постановку задачи, хотя на практике и при выполнении объемного моделирования такой вывод не подтверждается. Суть даже не в самой силе трения, а в возможности свободного перемещения породных слоев относительно друг друга. В плоской постановке тяжело адекватно задать эту механическую характеристику, отсюда большая внутренняя погрешность вычислений: как результат – неадекватные первичные данные расчетов, на основе которых делаются соответствующие выводы. Для пространственной модели указанные проблемы не являются характерными.

Создание расчетной модели начинается с изучения структуры горного массива в области расположения подземной выработки. Необходимо выделить элементы горного массива (породные слои), которые имеют характерные геометрические и механические характеристики: для каждого из слоев создается трехмерная модель, которая имеет линейные размеры до сотни метров; потом модели слоев собирают в модель горного массива согласно его реальной структуре.

Следующий этап – моделирование выработки в горном массиве. Эта операция достаточно простая и состоит из двух действий: построение поперечного сечения выработки и расположение ее оси в нужном месте модели горного массива. Потом (или параллельно) создается модель крепи выработки. Технология создания модели существенно отличается не только для разных типов крепей, но и для разных условий проведения вычислительных экспериментов. Больше того, отдельной, а иногда значительной проблемой является процедура размещения модели крепи в модели горного массива с выработкой, которая нуждается в определенной квалификации при воспроизведении адекватных условий контакта.

В понятие решения МКЭ обычно включают не только подход к решению прикладных задач, но и совокупность численных методов, которые позволяют получить результат в нескольких постановках исходной задачи. Выбор постановки задачи должен быть обусловлен особенностями реального объекта и расчетной модели, которая создана на его основе. Для поставленной выше задачи последовательно выполнялись расчеты для одной и той же моделируемой области в постановках: упругая, упруго-пластическая и учет предельного состояния. Сравнительный анализ результатов позволяет определить правомерность выбора того или другого типа физической задачи, в рамках которой возможно получение приемлемых конечных результатов исследований. Более того, на этом этапе исследования в ходе проведения расчетов выполняется анализ значимости отдельных показателей модели на результаты определения НДС системы «слоистый массив-крепь выработки». В это понятие входят: определение наилучших показателей сходимости численных методов; условия контакта между элементами расчетной модели; начальные условия расчета; граничные условия модели, внешний размер расчетной области; уровень детализации и вид вычислительной сетки.

Метод конечных элементов относится к так называемым сеточным методам, для которых характерно распределение основной области расчета на более мелкие расчетные подобласти, называемые конечным элементом. Физическое состояние конечного элемента описывается рядом непрерывных математических функций, вид которых для каждого элемента может быть задан произвольным образом. Поэтому размер и форма конечного элемента определяют точность и размерность расчетов. Конечно, построение вычислительной сетки, определение ее оптимальных параметров является отдельной специфической подзадачей вычислительного эксперимента.

Для нашей задачи выбор формы конечного элемента в виде тетраэдра обусловлен его достаточной универсальностью для описания разнообразных геометрических форм; и вдобавок рассмотрение конечного элемента как геометрической фигуры второго порядка позволяет увеличить размер самого элемента без потери точности вычислений. Вычислительная сетка имеет переменный шаг, который дает возможность качественного описания всех элементов расчетной модели независимо от их линейных размеров. Кроме того, для дальнейшего анализа поставленной задачи при построении сетки конечных элементов были использованы контрольные точки (датчики). В такую точку при построении вычислительной сетки обязательно располагается узел конечного элемента, который позволяет получить «точное» значение напряжений и деформаций в характерной точке расчетной области. В данных исследованиях эти точки расположены по контуру выработки и на внешней поверхности ее крепи.

После построения вычислительной сетки, и определения основных показателей, влияющих на качество расчета, переходят к проведению самого вычислительного эксперимента. На данном этапе исследователь выполняет в основном пассивную роль: его участие сводится к наблюдению за процессом расчета и при необходимости вносятся изменения в расчетную конфигурацию вычислительной машины. Но иногда, например, при проведении данных исследований, полученные результаты нуждаются в дополнительном тестировании модели, необходимость которого обусловлена следующими факторами: промежуточные расчеты показали появление особых точек в областях, где их не должно быть по теоретическим представлениям; неправильно были выбраны условия контакта элементов крепи; анализ сходимости используемых численных методов показал их неудовлетворительное качество.

На современном этапе развития методологии вычислительного эксперимента принято визуализировать полученные результаты для наглядности их дальнейшего анализа. При использовании в исследованиях объемной модели необходимо (для дальнейшего анализа) выбирать характерные сечения. Например, в данной задаче можно выделить три безусловно характерных сечения: вертикальное сечение вдоль выработки, которое проходит сквозь ось ее симметрии; вертикальное поперечное (относительно выработки) сечение, которое проходит сквозь ось симметрии профиля рамной крепи; вертикальное поперечное (относительно выработки) сечение равноотстоящее между двумя соседними рамами. Наиболее информативным сечением было выбрано последнее по результатам первичного тестирования. Для этого сечения были построены следующие четыре эпюры: интенсивности напряжений  $\sigma$ ; нормальных вертикальных напряжений  $\sigma_y$ ; нормальных горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ ; полных перемещений  $U$ . Выбор этих эпюр обусловлен общепринятым подходом к анализу первичных данных расчета. Среди других возможных вариантов эпюр (главные напряжения, касатель-



ные напряжения, линейные перемещения и др.) эти наиболее информативные и наглядные с точки зрения прикладного анализа данных. Кроме того, комплексный анализ указанных эпюр обеспечивает всестороннее описание напряженно-деформированного состояния геомеханической модели. В некоторых случаях эпюры построены только для отдельных элементов модели – отдельно крепи выработки, отдельно приконтурного горного массива. Такой подход обусловлен необходимостью качественного анализа эпюр как для крепи, так и для приконтурного массива потому, что порядок значений напряжений в крепи и окружающем массиве весьма отличаются. Ведь становиться невозможным в рамках одной эпюры подобрать такой диапазон значений, который бы сделал доступным визуальное отображение градиента напряжений по всей расчетной области.

При решении задачи в упруго-пластической постановке или с учетом реологического фактора эпюры напряжений для удобства анализа представляют в виде анимационных роликов, которые отображают процесс изменения поля напряжений на разных этапах существования модели.

Следующим этапом подготовки первичных данных является построение обычных графиков, которые отображают в одной или нескольких контрольных точках состояние или изменение определенной механической характеристики. Для этого по номеру расчетного узла делается выборка информации из массива данных, которые получены в результате расчетов. Изъятые данные собираются в сводные таблицы, которые потом используются для построения необходимых графиков.

В дальнейшем проводится статистическая обработка результатов вычислений и определяются уравнения регрессии для расчета тех геомеханических параметров, которые интересуют исследователя: например, в поставленной задаче был определен ряд уравнений для расчета перемещений контура выработки в наиболее информативных точках. Эта информация будет нужна в дальнейшем для комплексной оценки состояния выработки по комплексу критериев ее безопасной эксплуатации.

## **ВЫВОДЫ**

На базе рассмотренных особенностей решения МКЭ задач геомеханики описана общелогическая структура методологии исследования НДС любой системы.

Рассмотрены основные факторы, которые обеспечивают адекватность геомеханической модели реальному объекту: размер и форма расчетной области, характер и величина начальных и граничных условий, модель поведения каждого из основных элементов геомеханической системы. Указанные факторы должны проходить оптимизацию для каждой серии расчетов, а правильное их отображение обеспечивает сходимость вычислений с малой погрешностью.

Разработана блок-схема для наглядного представления трехэтапного процесса актуализации расчетной модели, по которой проводится вычислительный эксперимент: создание геометрических объектов, привязка к ним физико-механических свойств и оптимизация модели.

Вышеупомянутые факторы и этапы выполнения исследований с помощью МКЭ приобрели определенную конкретизацию на примере моделирования поведения геомеханической системы «слоистый массив-крепь выработки», где последовательно обоснован порядок проведения вычислительного эксперимента.

#### **4. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ ПО РАСЧЕТУ НДС МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «МАССИВ-ОПОРНО-АНКЕРНАЯ И РАМНО-АНКЕРНАЯ КРЕПИ-КРЕПЬ УСИЛЕНИЯ- ОХРАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ»**

Проведение любого эксперимента вызвано необходимостью выявить и правильно оценить конкретный фактор или группу факторов, влияющих на состояние или развитие процессов в системе объектов научного исследования. Простейшие эксперименты позволяют выявить и, затем, математически описать фундаментальные физические законы. В таких экспериментах необходимо максимально упрощать объект исследования с целью минимизации воздействия на получаемый результат сторонних факторов.

Такого рода эксперименты должны давать однозначный результат во всех сериях их проведения, поскольку отклонения, получаемые даже в одном опыте, могут свидетельствовать о неверном представлении физического закона, действенность которого подтверждают. Подобные исследования являются фундаментом любой современной науки, основывающейся на физико-математическом описании природы. Результаты этих экспериментов формируют общую базу научных представлений о конкретном явлении, на основе которой в последующем проводится анализ адекватности и точности результатов, получаемых как математическим расчетом, так и физическим моделированием.

Таким образом, формируется основа предварительного анализа любого эксперимента, проводимого в условиях многофакторного воздействия на исследуемый объект. Последующим этапом развития прикладной физики стало проведение экспериментов по выявлению воздействия на объект исследования совокупности факторов, имеющих статическую природу и относящихся к одной группе физических знаний. Примером можно считать, расчеты несущих конструкций (крепи выработки или опоры моста) под воздействием внешнего давления. Простота конструкции и отсутствие необходимости анализа природы внешней нагрузки позволяло выполнять для этих задач аналитические решения. И эти решения удовлетворяли исследователей до тех пор, пока условия эксплуатации реальных объектов, подвергающихся экспериментам, не поставили под вопрос адекватность моделирования. Это привело к резкому росту числа лабораторных экспериментов, тщательным образом моделирующих геометрию и методику нагружения реального объекта. Результатом этих исследований можно считать повышение расчетной сложности решаемых задач и формирования, так называемого,

пошагового проведения эксперимента. Простейшим примером пошагового эксперимента является расчет поведения баллистической ракеты во время ее полета: на первом шаге ракета рассматривается как «карандаш» с определенной массой и габаритами, благодаря расчету определяются кривая баллистики и перегрузки, действующие на ракету; на втором шаге – ракета уже объект со сложной структурой усиления, выполняются расчеты на продольную и поперечную прочность корпуса; на третьем... и так далее.

В результате рост сложности задач, решаемых прикладной механикой, привел к необходимости совместного анализа многих факторов, действующих на объект исследования в виде их комбинации во времени и пространстве. Создание объектов и анализ проведения экспериментов путем аналитических исследований стало необоснованно затратным как по времени, так и по выполнению объемов расчетов. Лабораторное моделирование не позволяет проводить большие серии экспериментов и в ряде случаев требует сверхсложного дорогостоящего оборудования, что в совокупности позволяет проводить качественные исследования только в узком кругу научных лабораторий.

Появление сеточных численных методов позволило вывести вычислительный эксперимент на новый уровень. Возможность разделить объект исследования на отдельные участки (элементы) позволяет сформировать его сложную геометрию и физическую структуру совместно с разнообразной системой внешних факторов, воздействующих на расчетную область без и с учетом фактора времени. Примером реализации такого подхода является расчет на устойчивость несущей фермы нефтедобывающей платформы. На ферму воздействует: масса платформы; боковое давление ветра в верхней части; колебания воды в нижней; ледовые пробки и агрессивные морские соли. Расчет во времени с учетом всех перечисленных факторов привел к результату когда несущая способность фермы снизилась на треть в течении пяти лет эксплуатации, причем определяющим внешним воздействием оказалась морская соль, под действием которой происходило разрушение поперечных элементов фермы, что и привело к конструктивным нарушениям. Как видно, при решении конкретной задачи были рассмотрены факторы из разных областей знаний. Эксперимент выполнялся не просто пошагово, но и на пересечении механики конструкций и химии агрессивных сред. При этом наиболее часто используемым подходом в расчете сложных конструкций, находящихся под воздействием набора внешних факторов, является метод конечных элементов. Его относительно простая и в достаточной степени универсальная математическая база в совокупности с широким спектром описания физических сред позволяет моделировать системы сложные, с точки зрения геометрии, свойств материалов, особенностей применения начальных условий и внешних нагрузок. При этом алгоритмический подход в реализации того или иного эксперимента остается однотипным и не требует значительной перестройки методологии вычислительного эксперимента.

Но, безусловно, связь между лабораторным и вычислительным экспери-

ментом остается, достаточно, высокой. Для проведения расчетов приходится получать ряд значений физических величин, которые необходимо подставлять в ходе вычислений в виде коэффициентов обыкновенных и дифференциальных уравнений. Кроме того, адекватность получаемых результатов можно оценить только путем сравнения результатов вычислительных экспериментов и натурных наблюдений, проведение которых так же является физическим экспериментом. Положительным в данном случае является то, что при помощи вычислительного эксперимента можно провести многочисленные серии анализа конструкций, варьируя как геометрию расчетной области, так и условия взаимодействия этой области с внешней средой. Таким образом, вычислительный эксперимент позволяет выбрать тот диапазон варьирования технологических факторов, который в рамках натурных экспериментов даст возможность малыми затратами получить наиболее оптимальный результат.

Определение НДС любой не примитивной системы, находящейся под действием сложной загрузки, в том смысле, что величина этой нагрузки и ее распределение может изменяться в пространстве и времени, является не тривиальной задачей, требующей четкого представления об условиях моделирования взаимодействия отдельных элементов расчетной области. Выполнение работ по формированию такой модели обычно происходит в три этапа: *первый* – создание и отработка моделей отдельных элементов «простых» в смысле геометрии и приложения нагрузок; *второй* – комбинирование простых моделей и условий их сопряжений в рамках общей расчетной области; *третий* – связывание между внешними нагрузками, граничными условиями расчетной области и ее отдельными элементами.

Учитывая продолжительность и трудоемкость отработки таких расчетных моделей, зачастую, прибегают к их радикальному упрощению. В этом смысле, в геомеханике реализуется подход, позволяющий проводить расчеты НДС крепи выработок и горного массива отдельно. Эффективность этого подхода резко снижается с ростом сложности взаимодействия элементов крепи выработки и окружающего ее горного массива. Подобным усложнением является нелинейность поведения конструкций крепи, не стационарные контактные усилия и учет запредельного состояния пород горного массива. В таких условиях физически оправданное решение поставленной задачи возможно только при задании наиболее полного описания многопараметрической системы распределения напряжений между элементами крепи и породными слоями.

Рассмотрим сложности и методологию подобного решения для объемной расчетной области, включающей в себя часть пластовой выработки вне и в зоне ее сопряжения с очистным забоем и поддерживаемой комбинациями опорно-анкерной и рамно-анкерной крепей [77]. Простейшими элементами такой расчетной системы, в физическом и геометрическом смыслах, будут – анкер, рама крепи, узлы связи анкеров и рамы, затяжка, забутовка и модель породного слоя в виде параллелепипеда.

В ходе исследований рассматривалось несколько вариантов реализации анкеров в реальной схеме поддержания выработки. Однако наиболее востребованными оказались простейший сталеполимерный [77] и податливый анкера. Оба типа анкеров имеют значительные отличия как в геометрии, так и в механике взаимодействия с горным массивом. В связи с чем, для этих объектов выбирались различные схемы моделирования.

Поскольку на данном этапе эксплуатации шахт Западного Донбасса наибольшее распространение получил сталеполимерный анкер, моделирование этого объекта вызывало наибольший интерес. Данный тип анкера обладает простейшей геометрией и механизмом взаимодействия с окружающими шпур породами. Поэтому, в вычислительных экспериментах, особенно выполняемых в упругой постановке, стараются максимально упростить этот объект, вплоть до удаления его из расчетной области путем замены совокупностью внешних нагрузок. Такой подход не может обеспечить необходимую точность определения НДС системы в условиях возникновения малейшей нелинейности при проведении вычислительных экспериментов.

Исследования поведения сталеполимерного анкера показали, что активная фаза сопротивления анкера горному давлению наступает после частичного разупрочнения окружающих его пород. В результате чего происходит не только перераспределение усилий в конструкции самого анкера, но и по всему контуру выработки. Проведение моделирования для различных горно-геологических условий показало наибольшую адекватность следующих расчетных схем: первая – анкер представляется как стальной стержень плотно установленный в шпур того же диаметра; вторая – к предыдущей схеме добавляется опорная шайба большого диаметра, жестко или через болтовое соединение контактирующая с анкером; третья – аналогична второй, но включает в себя увеличение диаметра шпура до натуральных размеров и заполнение его моделью отвердевшего полимерного состава.

При достаточной простоте геометрического моделирования сложно спрогнозировать реакцию сталеполимерного анкера во времени и при выборе упругопластической схемы поведения материалов. Если при упругом расчете схема воздействия начальных условий приложения нагрузки не может изменяться, в силу отсутствия значительных деформаций в продольном и поперечном сечениях анкера, то в случае значительных относительных перемещений, и вектор приложения нагрузок, и величина зоны контактного взаимодействия с горными породами, могут изменяться, причем, далеко не всегда по линейному закону. Это вынуждает при проведении вычислительного эксперимента применять не статичные условия контакта между элементами модели анкера и моделью горного массива.

Рассмотрим физику процесса взаимодействия анкера и поверхности шпура. В момент установки сталеполимерного анкера между сталью, полимерной композицией и образующими поверхность шпура породами устанавливаются связи на основе химико-молекулярного воздействия. Как правило, контакт между сталью и полимером имеет более равномерный и прогнози-

руемый характер, что определяется высокой однородностью данных материалов. Контакт между полимером и горным массивом хаотичен, как в смысле геометрии, сколы и микротрещины на поверхности шпура, так и механики материалов, породы обычно формируются из набора материалов, имеющих разные прочностные и химические характеристики. В результате, для реализации адекватного моделирования условий эксплуатации сталеполимерного анкера приходится, даже в рамках одной расчетной модели, использовать широкий набор начальных условий и типов контактов [78].

В простейшей геометрической схеме моделирования сталеполимерного анкера существует одна контактная поверхность, для которой, в условиях высокой поперечной нагрузки или значительной жесткости окружающих пород, задают контакт с соблюдением сплошности модели системы «анкер – порода». В случае, когда ожидается или возможна потеря контакта между породами и телом анкера, прибегают к комбинированной схеме, в которой часть поверхности модели шпура находится в жесткой связи с анкером, а часть этой поверхности образует контакт с анкером в условиях взаимного проскальзывания. Геометрические размеры таких областей, точнее их взаимоотношение, регулируется соотношением относительного удлинения анкера и вмещающих пород, с учетом пластических характеристик связывающего полимерного состава. Если учитывать предварительное натяжение анкера, то в расчетной схеме это условие, как правило, реализуется путем приложения необходимого усилия по нормали на открытом торце анкера. Однако такой подход не является в полной мере адекватным относительно распределения усилий и перемещений на поверхности контура выработки, и в случае значительных усилий предварительного натяжения анкера, следует переходить ко второй геометрической схеме моделирования сталеполимерного анкера.

Во второй расчетной схеме сталеполимерного анкера моделирование предварительного натяжения происходит благодаря наложению контактных условий для опорной плитки анкера. Применяются два основных подхода: *первый* – анкер устанавливается в шпур таким образом, чтобы внутренняя поверхность опорной плитки углубилась в породный контур выработки (так называемая «горячая» посадка), величина углубления определяет величину предварительного натяжения; *второй* – опорная плитка и стержень анкера контактируют через «болтовое соединение», усилие на котором и определяет усилие натяжения анкера, при этом контакт между опорной плиткой и породным массивом не может быть жестким.

В вариантах расчета взаимодействия анкеров и породного массива встречаются задачи, когда перерезывающие усилия, воздействующие на модель анкера, являются превалирующими относительно продольной нагрузки. В таких случаях на несущую способность анкера значительно влияют прочностные и деформационные характеристики полимерной композиции, используемой при его установке, и как результат для обеспечения адекватности расчета приходится прибегать к третьей схеме моделирования анке-

ра. Благодаря использованию такой схемы становится возможным сложное моделирование перемещения контура анкера с относительно большими деформациями в любом из выбранных направлений. Как правило, контакт между анкером и полимером выбирается жестким, а вот для контакта между полимером и породами используются либо жесткая связь, либо «горячая» посадка. В совокупности с экспериментальным подбором механических характеристик модели полимерной композиции, такая система контактов позволяет «плавно» учитывать особенности состояния реального горного массива (трещиноватость, трансверсальность, масштабный эффект и обводненность) при моделировании.

Из вышеизложенного, становится понятным, что формирование сетки конечных элементов, для общего случая моделирования сталеполимерного анкера, является задачей нетривиальной. Первая проблема общая для любого элемента крепи выработки – это малый размер конечного элемента в крепи выработки относительно размеров конечных элементов, используемых при описании горного массива. Сочетание размера конечного элемента, общего числа конечных элементов, условий сопряжений конечных элементов на границах отдельных объектов расчетной области определяет не только быстроту проведения расчетов, но и качество получаемого поля перемещений. В общем случае считается, что уменьшение линейных размеров конечного элемента всегда приводит к повышению качества получаемого результата. Это полностью соответствует реальности для относительно простых расчетов.

При малых размерах конечные элементы, описывающие геометрию анкера, приобретают форму тетраэдров. Причем общая картина сетки конечных элементов имеет ярко выраженный нерегулярный характер. В ряде вариантов расчетов такая сетка может приводить к образованию зон флуктуации напряжений, что искажает их общую картину. Как показал опыт проведения вычислительных экспериментов, для большинства решаемых задач оптимальным является выбор двадцатиузловых конечных элементов. Все эти элементы имеют одинаковую геометрию. Поперечное сечение анкера разбивается такими конечными элементами на четыре равных сектора, а ось симметрии анкера совпадает с общей кромкой всех четырех конечных элементов. Таким образом, весь анкер становится набором цилиндров определенной высоты состоящих из четырех одинаковых конечных элементов. Благодаря варьированию высоты таких цилиндров можно изменять плотность сетки конечных элементов, подбирая оптимальное соотношение числа конечных элементов и точности описания геометрии анкера при задании начальных и граничных условий.

Теперь перейдем к рассмотрению податливого анкера. В связи с конструктивной сложностью анкера широкое варьирование его расчетных схем не целесообразно. Приемлемое описание поведения такого анкера возможно только при явном моделировании практически всех его узлов. Итак, модель податливого анкера обычно состоит из следующих объектов: втулка – моде-



лирует набор резиновых втулок, устанавливаемых под давлением между металлическим стержнем анкера и породным массивом; стержень с утолщением на одном конце – это собственно стальной анкер, а утолщение – модель шайбы, на которую опираются резиновые втулки; опорная плитка – устанавливается в устье шпура и через «болтовое соединение» контактирует с моделью анкера; прижимная шайба (иногда заменяемая равномерно распределенным давлением) – замыкает свободный торец втулки и контактирует с анкером через «болтовое соединение».

Условия контакта между стержнем и торцом втулки, и торцом втулки и прижимной шайбой определяются как жесткая связь. Контакт между стержнем и внутренней поверхностью втулки определяется как без проникновения и без учета трения. Контактные условия для опорной шайбы совпадают с условиями, выбираемыми для сталеполимерного анкера, а условия контакта внешней поверхности втулки и поверхности шпура выбираются в виде взаимного проскальзывания с указанным коэффициентом трения.

В ряде случаев, при большом количестве конечных элементов, целесообразно заменять прижимную шайбу давлением на свободный торец втулки. Такая замена упрощает построение сетки конечных элементов, но, во-первых, требует дополнительных предварительных расчетов, а во-вторых, в случае, когда система не может быть решена в малых перемещениях такой вариант может приводить к потере устойчивости в итерационном процессе численного моделирования.

Податливый анкер конструктивно обеспечивает постоянный контакт с поверхностью шпура, в который он установлен, в прогнозируемой зоне. Поэтому прогнозировать, и, следовательно, адекватно моделировать начальные и граничные условия для этого элемента крепи выработки не составляет значительных проблем. Такой анкер слабо подвержен воздействию перерезывающих усилий, поэтому на вид модели анкера не влияет место его расположения в расчетной области.

Наибольшие проблемы, с точки зрения моделирования, вызывает прогнозирование взаимодействия резиновой втулки и поверхности шпура. Здесь многое зависит от правильно выбранного типа взаимоотношения материала резиновой втулки и пород, слагающих контур шпура. Если выбираемые контактные усилия будут значительно отличаться от реальных, возможно возникновение больших погрешностей в выполнении расчетов. Это связано с тем, что за счет рассматриваемых условий контакта необходимо смоделировать поведение анкера в статичной и псевдодинамичной расчетной системе [79]. Проще говоря, параметры зоны контакта определяют момент, когда происходит перемещение втулки анкера относительно поверхности шпура и переход системы в новое равновесное состояние.

Единственной особенностью построения сетки конечных элементов для податливого анкера, относительно сталеполимерного, является дискретизация резиновой втулки. *Во-первых* – сетка втулки не сопрягается по узлам с сеткой стержня анкера, поскольку с учетом высокой пластичности материа-

ла втулки максимальный линейный размер конечного элемента должен быть предельно малым, чтобы обеспечить относительно небольшое приращение деформаций в пределах одного элемента. Это гарантирует достаточную устойчивость расчетов в пластической зоне поведения материалов вычислительной модели. Во-вторых – размер конечных элементов, описывающих поверхность шпура, должен быть соизмерим, а в идеале одинаков, с размером конечных элементов, описывающих резиновую втулку. Таким образом, незначительно, но упрощается проведение расчета по определению взаимного смещения узлов на поверхности втулки и шпура.

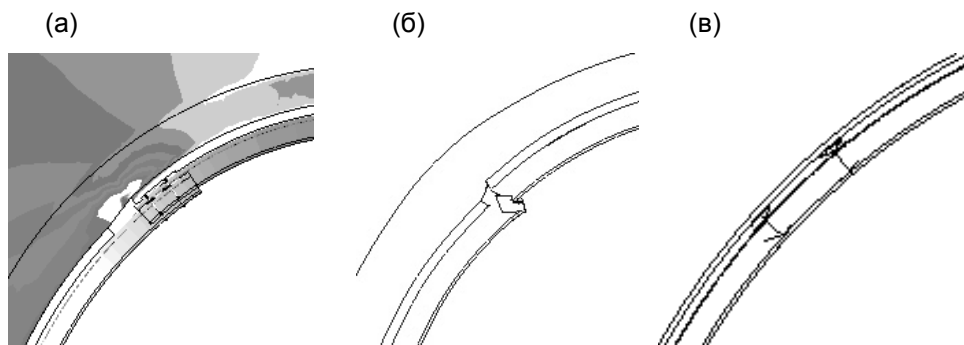
Как известно, на большинстве угольных шахт Украины для поддержания горных выработок анкера самостоятельно применяют крайне редко [80]. В основном анкера эксплуатируются в сочетании с классической податливой рамной крепью. Моделирование рамной крепи является отдельной, в достаточной мере сложной задачей, которую в свою очередь можно разделить на несколько этапов.

Начнем с рассмотрения основного вопроса: насколько точно необходимо описывать геометрию поперечного профиля рамы? В общих случаях стараются пренебречь или максимально упростить геометрию податливой рамной крепи. Для этого, как правило, используют два основных подхода: когда все конструктивные элементы крепи заменяются простой геометрической фигурой с фиксированной толщиной в поперечном сечении и усредненными механическими характеристиками (комбинация этих показателей формируется на основе прогнозируемого отпора реальной крепи) и когда крепь замещается равномерным давлением по поверхности контура выработки. В обоих случаях получаемые картины напряженно-деформированного состояния расчетной области могут качественно соответствовать только упругому состоянию реального горного массива, поскольку при развитии нелинейных процессов в поведении любого материала требует точной локализации их очагов в пределах выбираемых геометрических объектов.

Замена реального поперечного сечения рамы простой моделью в виде прямоугольника, с одной стороны, снижает размерность расчетной области, с другой – повышает устойчивость проводимых расчетов. Но при расчете с учетом предельного и запредельного состояния материалов, как показал опыт, такое упрощение ощутимо влияет на рост напряжений по контуру выработки в определенном поперечном сечении. Таким образом, использование реальной геометрии поперечного сечения рамы, хотя и увеличивает сложность вычислений, но наиболее полно позволяет описать факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние системы «массив-крепь».

Теперь перейдем к рассмотрению влияния качества моделирования узла податливости рамной крепи на распределение напряжений и деформаций в самой раме и примыкающем к ней горном массиве. Применение узла податливости в конструкции рамной крепи позволило в значительной степени поднять ее эксплуатационные характеристики. Однако, этот узел как фактор,

влияющий на НДС системы, усложнил физику процесса, протекающего в реальных условиях. Конструктивная особенность данного элемента крепи при высокоточном моделировании (рис. 4.1, а) в значительной степени увеличивает вычислительные затраты и снижает устойчивость получаемых решений. При определенных условиях верхняя часть рамы может прокручиваться относительно стоек, что отрицательно сказывается на статическом равновесии всей расчетной области. Поэтому применяется упрощенная модель узла податливости (рис. 4.1, б), которая обеспечивает и сплошность модели крепи с сохранением остальных геометрических характеристик модели рамной крепи. Однако, данная технология моделирования не может гарантировать возможность больших перемещений элементов рамы относительно друг друга во всем диапазоне рассматриваемых задач геомеханики. Когда прогнозируются значительные перемещения контура выработки, тогда применяется другая модель узла податливости (рис. 4.1, в). В этом случае, геометрическая аутентичность внешнего контура рамы незначительно нарушается, для разных моделей крепи линейные отклонения не превышают 50 мм, но теперь моделью допускаются значительные линейные (до 400 мм) и радиальные (до 20°) перемещения [78, 79].



**Рис. 4.1. Моделирование узла податливости рамной крепи: а) геометрически точная модель; б) модель узла, обеспечивающая его подвижность без учета динамики с сохранением оригинального контура рамы; в) модель узла, обеспечивающая большие перемещения без сохранения учета динамики**

Таким образом, моделирование податливости рамной крепи связано с возможностью учета в расчетной модели больших перемещений. Это достигается за счет моделирования узла податливости, который в расчетной модели представлен вставкой из материала, обладающего низкими показателями сопротивления сжимающим усилиям. На рис. 4.1, б хорошо видны перемещения верхней части рамной крепи, которая опустилась вниз и одновременно вдавила модель узла податливости в боковую стойку. В результате перемещения точек свода выработки, при использовании модели узла

податливости приведенного на рис. 4.1, в, может составлять до 330 мм [78], что в свою очередь приводит к увеличению зоны предельного состояния пород, образующих свод выработки.

Элементы рамной крепи, обеспечивающие контакт рамы и контура выработки, следует моделировать с низким уровнем детализации. Поскольку такие объекты вводятся в конструкцию для обеспечений передачи усилий и воспринимают внешнюю нагрузку по простой схеме [77]. Но пренебрежение такими объектами может значительно изменить картину НДС рамы и прилегающих к контуру выработки пород. К таким элементам относят железобетонную затяжку, породную забутовку, металлическую крупноячеистую решётку и т.п.

Железобетонную затяжку и забутовку можно представлять как единый усредненный по механическим характеристикам объект, геометрия которого соответствует в совокупности геометрических характеристик описываемых реальных объектов. В большинстве случаев такой подход гарантирует достаточную адекватность полученного примитива и реальных характеристик объекта [80]. Для варианта, когда необходимо разделить в расчете затяжку и забутовку приходится описывать геометрию бетонных блоков в соответствии с внешней кривизной рамы. Это позволяет уйти от решения контактных задач между телами, соприкасающимися по поверхностям разной кривизны. Для эмуляции поведения сыпучей среды сама забутовка описывается механическими параметрами, соответствующими поведению сплошной среды с высокими деформационными показателями и с использованием линейно-кусочного закона связи деформаций и напряжений. При этом модуль Юнга выбирается стремящемся к значению в 0,5.

Деревянные стойки (ремонтини), используемые для повышения несущей способности рамной крепи в зоне влияния очистных работ, как правило, моделируются в виде цилиндров, радиус поперечного сечения которых соответствует реальному радиусу стойки. При построении сетки конечных элементов необходимо обеспечивать наличие 6-10 элементов в одном поперечном сечении модели стойки. При этом максимальный размер этих элементов должен быть ориентирован, как и в случае с анкерами, вдоль высоты цилиндра. Поскольку данный объект находится под действием осевых сжимающих усилий, такой подход снижает вероятность перехода модели к большим поперечным перемещениям. Если же подобный эффект устранить не удастся, приходится прибегать к ограничению поперечных перемещений боковой поверхности цилиндра по всей его высоте. В физическом смысле, проблема возникает с моделированием древесины. В данном случае приходится использовать ортотропный материал, характеристики которого в поперечном сечении отличаются от аналогичных показателей вдоль оси симметрии модели.

Гидравлическая стойка, как механический объект, обладает ярко выраженными динамическими характеристиками. Чтобы уйти от проблем, связанных с правильным описанием этих характеристик в расчетной модели, в

ряде случаев, такую стойку заменяют либо на цилиндр, с эквивалентными геометрическими и прочностными характеристиками, либо на комбинацию усилий, прилагаемых в местах контакта реальной стойки. И тот и другой подход плохо согласуются с реальностью. Поэтому при моделировании этого объекта с учетом больших перемещений используют пустотелый цилиндр, толщина стенок которого соответствует толщине реального объекта, а внутренняя поверхность нагружена задаваемым гидростатическим давлением. При этом, если в расчете необходимо учитывать сброс давления в стойке, внутреннее усилие можно задавать циклическим образом, как с учетом реального времени так и без.

Особенности взаимодействия стоек крепи усиления с верхняком рамы и породами почвы выработки требует использования особого подхода в построении сетки конечных элементов для этих объектов. Проблема заключается в возникновении концентраторов напряжений в зоне моделей стоек, примыкающих к контактными поверхностям. В результате приходится уменьшать максимальный размер конечного элемента, примыкающего к поверхности контакта. Однако, слишком сильно минимизировать этот показатель также не допустимо, поскольку обычно контакт между стойками и другими объектами расчетной области является жестким. Малые размеры конечных элементов могут привести к появлению флуктуаций в картине напряжений вблизи контактных поверхностей.

Наиболее простым объектом, с точки зрения геометрического и физического описания, является охранный литая полоса. И возможные материалы, и используемая геометрия в условиях сохранения сплошности моделируемого объекта имеют однозначную схему моделирования, которая в подавляющем числе выполняемых расчетов удовлетворяет задаваемым погрешностям. Если говорить о взаимодействии литой полосы и других элементов расчетной области, то здесь основной схемой можно считать жесткую связь по всем граням модели охранной полосы. В случаях, возможных больших перемещений и контакта с рамной крепью следует устанавливать контакт с проскальзыванием без учета силы трения.

Описание моделей породных слоев, как набора отдельных геометрических элементов, не представляет серьезного интереса, поскольку в достаточной мере тривиально; геометрически это набор параллелепипедов, а механически – это усредненные характеристики, полученные экспериментально или обоснованные на основе лабораторных и натурных исследований. С другой стороны, если рассматривать горный массив как совокупность породных слоев, описание их взаимодействия в рамках конкретной задачи становится прикладной проблемой. В зависимости от условий постановки задачи одни и те же свойства неоднородности горного массива могут в разной степени влиять на точность получаемых результатов.

Слоистость горного массива в значительной степени изменяет распределение напряжений, как вокруг контура выработки, так и в зонах, прилегающих к границам породных слоев. При этом степень влияния на поля напря-

жений для различных компонент системы может колебаться в пределах от 10 до 270%.

Для наглядности рассмотрим эпюру напряжений, которая представлена на рис. 4.2. Основная причина, благодаря которой влияние слоистости настолько большое, в данной расчетной модели, есть разница в прочности породных слоев. Породные слои, образующие подошву и бока выработки, обладают повышенной жесткостью по отношению к породным слоям, которые формируют верхнюю и нижнюю области расчетной модели. Это приводит к концентрации напряжений в пределах геометрической области конкретного слоя.

При учете слоистости встает вопрос о целесообразности учета угла падения угольного пласта для адекватности полученных результатов? В большинстве аналитических и численных математических решениях этим фактором пренебрегают, поскольку это позволяет в значительной степени снизить сложность конечных математических уравнений и/или упростить расчетную модель путем применения уравнений симметрии.

В подтверждение всего вышесказанного проанализируем картину распределения напряжений на рис. 4.2. Основная особенность этой эпюры заключается в отсутствии симметрии относительно вертикальной оси пластовой выработки, то есть распределение напряжений в боках выработки имеет разный качественный и количественный характер. Причем, величина подобного дисбаланса зависит и от величины угла падения и от физических характеристик породных слоев. Для различных расчетных моделей такой дисбаланс может составлять до 40% в количественных показателях и до 180% в качественных. Такие показатели, для реальной пластовой выработки, можно достичь только при учете угла падения пласта в расчетной модели, если в натурных условиях величина этого угла составляет более  $3^\circ$  [80].

Кроме того, что породные слои могут иметь различную геометрию и физические характеристики, в ходе моделирования для повышения адекватности полученных результатов, приходится менять условия контактов на границах этих слоев. В общем случае можно выделить три типа таких контактов. Это жесткий контакт, контакт с проскальзыванием и контакт с учетом силы трения. Применение того или иного типа контакта может приводить к качественным и количественным изменениям картины распределения напряжений, которые представлены на рис. 4.3.

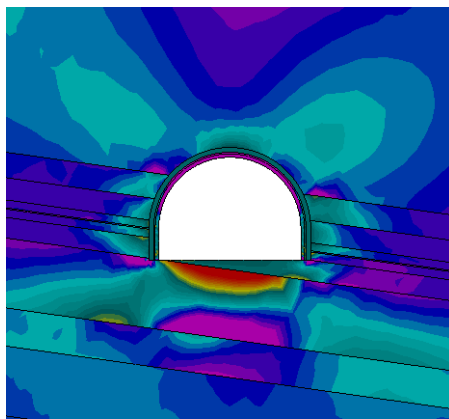
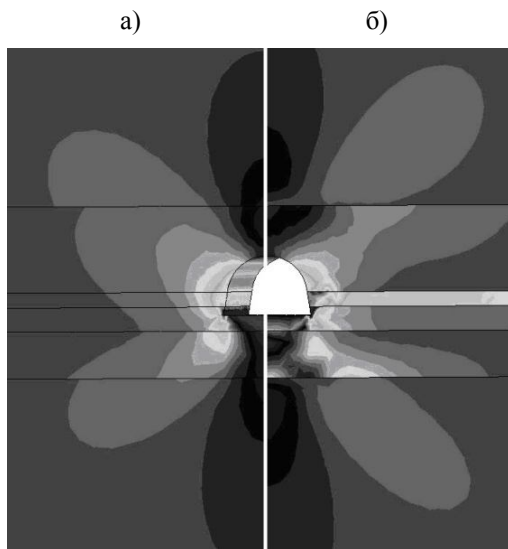


Рис. 4.2. Распределение напряжений в тонкослойном массиве вблизи пластовых выработок

В случае жесткого контакта (рис. 4.3, а), при горизонтальном залегании и незначительном диапазоне физических характеристик породных слоев, картина распределения напряжений в значительной степени совпадает с распределением напряжений в модели, где не учтена слоистость. А вот в случае рис. 4.3, б картина напряжений в значительной степени отличается от распределения напряжений в модели без учета слоистости. Такое изменение в качественных и количественных показателях картины напряжений вызвано введением в расчетную модель взаимного проскальзывания породных



**Рис. 4.3. Распределение интенсивности напряжений в массиве (а) без учета проскальзывания на грани породных слоев; (б) с учетом проскальзывания на грани породных слоев**

слоев. Теперь уровень напряжений в угольном пласте выше, чем в окружающих породах и его вклад в повышение устойчивости выработки значительно возрастает.

Сложности моделирования взаимодействия элементов системы «массив-опорно-анкерная крепь» сконцентрированы в зонах взаимодействия анкеров и поддерживающих контур выработки элементов крепи. К таким элементам относятся крупноячеистая решетка и опорные металлические полосы, имеющие несколько отверстий под крепеж. Такие металлические полосы позволяют объединить в единую жесткую грузонесущую структуру несколько анкеров, устанавливаемых в ряд в кровле выработки между рамами. Простейшим способом объединения анкера и подобной опорной металлической полосы является

жесткий контакт. При этом высоту в поперечном сечении модели полосы необходимо увеличивать относительно реального значения. Это необходимо для обеспечения игнорирования в общей модели крепи опорной плитки каждого контактирующего анкера.

Контакт между поверхностью опорной полосы и поверхностью горного массива должен быть определен как свободные без использования силы трения. Это связано с двумя моментами. *Во-первых*, в ходе расчета перемещения отдельных анкеров относительно друг друга может иметь разные направления и абсолютные величины, что приведет к возникновению дополнительных напряжений в самой полосе. При этом если полоса будет жестко связана с горным массивом, это приведет к неверной коррекции напряженно-деформированного состояния на контуре выработки. *Во-вторых*, ко-

гда между полосой и поверхностью горного массива будет располагаться крупноячеистая решетка она, в реальных условиях, не будет ограничивать перемещения опорной полосы вдоль поверхности горного массива.

В конструкции рассматриваемой крепи крупноячеистая решетка играет роль интеграционного фактора, обеспечивающего распределение усилий между установленными в кровле выработки анкерами и рамами. Однако, по сути эта решетка ограничивает свободное перемещение приконтурных пород в выработку. Причем величина сопротивления подобному перемещению в поперечном сечении конструкции относительно невелика. Это позволяет рассматривать данный элемент конструкции как жесткую мембрану, закрепляемую в местах ее контакта с анкерами и рамами крепи. В результате крупноячеистая решётка моделируется как объект, повторяющий контур выработки с толщиной, не превышающей диаметр прута решетки, и механическими характеристиками, соответствующими податливому материалу.

Иначе обстоит дело при моделировании рамно-анкерной крепи [77]. В этом случае дополнительной проблемой является обеспечение грамотного моделирования системы передачи усилий между стойкой рамы и боковым анкером, объединяемых свободно пропущенным гибкой стяжкой (тросом). В реальных условиях такой трос свободно огибает раму и располагается между опорной и дополнительной плиткой анкера. В этом случае трос может свободно проскальзывать по всей своей длине относительно боковых анкеров и стоек рамы. Тогда нагрузка, воспринимаемая тросом на отдельном участке, может передаваться вдоль него на значительные расстояния. Эта особенность рамно-анкерной крепи, являясь бесспорным достоинством с позиции инженерного применения, с точки зрения вычислительного моделирования представляют собой набор проблем.

Перечислим эти проблемы: отсутствие жесткой привязки троса – статическая неопределенность системы; сложность адекватного описания геометрии троса – выбор формы продольной оси модели троса; передача усилий в зонах контакта анкер – трос и рама – трос – решение контактной задачи; учет деформирования троса в условиях возникновения зон пластического течения в элементах расчетной модели.

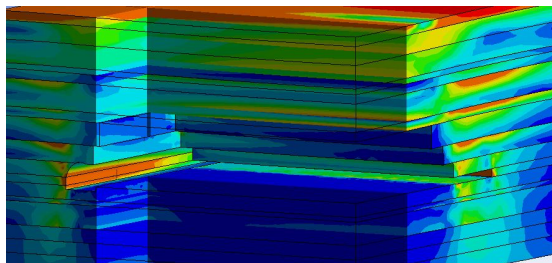
Наиболее адекватным можно считать моделирование троса, выполненное следующим образом: *во-первых* – трос объединили с анкером, связав тело троса со свободным концом анкера; *во-вторых* – форму продольной оси троса выбрали в виде синусоиды с прямыми отрезками на максимуме функции; *в-третьих* – предварительное натяжение троса моделировали путем частичного проникновения тела троса в тело рамы.

Но в таком варианте моделирования скрывается незначительная проблема. Поскольку ограниченность продольных перемещений и малая эластичность модели троса не позволяют при различных значениях перемещений анкера и рамы соблюдать сплошность расчетной модели, адекватность модели нарушается уже на начальных этапах расчета. При относительно малых деформациях свободный конец анкера перемещался в полость вы-

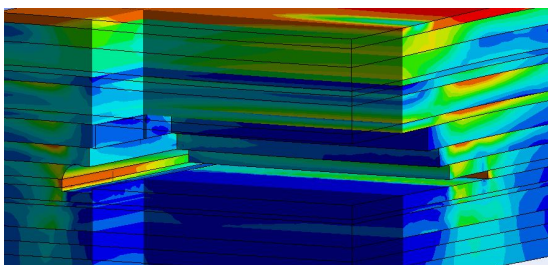


работки интенсивней, чем рама. В результате трос выходит из непосредственного контакта с рамой. С продолжением упругопластического расчета и ростом пластических деформаций трос опять вдавливается в раму. Однако,

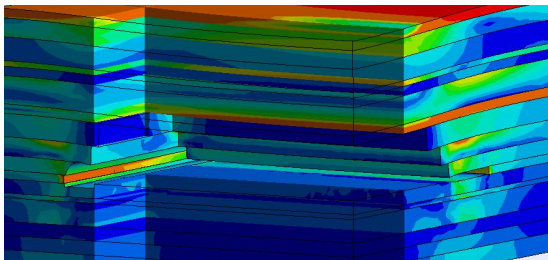
а)



б)



в)



**Рис. 4.4. Моделирование сопряжения откаточного штрека и очистного забоя: а) упругопластический расчет; б) расчет с учетом реологии (10 часов); в) расчет с учетом реологии (90 часов)**

за счет ранее потерянного контакта в системе «трос – рама», становится невозможным рассчитать передачу усилий через вновь образованную контактную площадку. В результате приходится решать эту проблему в два расчетных шага: *первый* – расчет НДС до момента натяжения троса анкером; *второй* – коррекция параметров контакта между тросом и рамой и продолжение расчета.

Все выше сказанное относится к конструктивным элементам крепи выработки. Однако, функционирование самой крепи, в значительной степени, зависит от изменения НДС горного массива. А эти изменения, в свою очередь, могут происходить в результате проведения или погашения горных выработок, проявления реологических свойств горных пород и т.п. Основополагающим фактором для учета в расчетной модели влияния подобных изменений становится фактор времени.

Результатом учета времени при расчете напряжений и деформаций в горном массиве становится перераспределение усилий, воспринимаемых элементами крепи. Так же, из-

менение геометрии выработок во времени вносит коррективы в ориентацию площадок главных напряжений в приконтурном горном массиве. В совокупности, учет этих факторов может привести к кардинальному перераспределению усилий на поверхностях контакта крепи и горного массива, изменить

условия формирования этих площадок и как результат преобразовать деформационную картину крепи выработки.

Ярким примером влияния реологических свойств горных пород на изменение НДС горного массива является серия расчетов, проведенная для ПСП «Шахта «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». Результаты расчетов показывают, как изменяется распределение напряжений и перемещений в зоне сопряжения откаточного штрека и очистного забоя (рис. 4.4) во времени. На рис. 4.4, а представлена картина интенсивности напряжений, полученная для задачи, решенной в упругопластической постановке. Для этого варианта решения характерны наибольшие значения напряжений и минимальные величины абсолютных перемещений. Расчет, выполненный с учетом реологии в пределах десяти часов реального времени показал, что абсолютные перемещения в модели возросли незначительно, а вот картина распределения напряжений претерпела как качественные, так и количественные изменения (рис. 4.4, б). Наконец, спустя 90-то часов наблюдаем значительный рост перемещений в кровле и почве очистного забоя (рис. 4.4, в), с перераспределением нагрузки по породным слоям модели. Можно сказать, что формируется следующий этап обрушения пород.

Проявление влияния сопряжений выработок также носит зачастую локализованный во времени характер. В зависимости от взаимных размеров выработок и продолжительности существования, такое влияние на НДС системы может иметь, как незначительное (например, сопряжение откаточного штрека и бортового ходка), так и весьма ощутимое воздействие (пример см. рис. 4.4, в).

Исходя из выше перечисленного расчет НДС в зоне влияния очистных работ для выработок с рамно-анкерной крепью в условиях шахт, например, Донбасса, может быть выполнен только с учетом таких факторов как: конструктивная податливость рамной крепи; большие перемещения контура горного массива; релаксация напряжений, в результате учета реологических свойств пород, и, наконец, взаимное влияние горных выработок. В этом случае компенсация усилий и геометрических параметров расчетной области позволит получить средневзвешенную, а следовательно, наиболее вероятную картину НДС в зоне расположения реального объекта.

## **5. ОСОБЕННОСТИ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ И МЕХАНИЗМ НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК**

### **5.1. ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК**

Изыскание резервов повышения рентабельности угледобычи неразрывно связано с широкомасштабным применением ресурсосберегающих технологий поддержания горных выработок, среди которых особо сложными условиями эксплуатации выделяются выемочные выработки. Эта группа подготовительных выработок занимает ключевые позиции в обеспечении бесперебойного и высокопроизводительного технологического процесса добычи угля, а объем их проведения однозначно определяет главное направление экономии ресурсов – повторное использование с минимизацией затрат на поддержание. Наиболее сложные горно-геологические условия отработки угольных пластов характерны для слоистого массива слабых пород Западного Донбасса, где проблема поддержания повторно используемых выемочных выработок чрезвычайно актуальна. Мировая практика выделяет одно из приоритетных направлений ресурсосбережения при поддержании горных выработок – широкомасштабное и многофункциональное применение анкерной крепи как эффективное средство вовлечения самого породного массива в работу по сопротивлению проявлениям горного давления. Угольные шахты Украины и Западного Донбасса в частности не остались в стороне от этих современных тенденций активного использования технологии анкерного упрочнения, особенно такую разновидность как опорно-анкерное крепление [81] большей части подготовительных выработок, включая выемочные. В зоне влияния очистных работ весьма интенсивный асимметричный характер проявлений горного давления пока не позволяет использовать только анкерную крепь, как самостоятельный вид крепи, поэтому сохранение эксплуатационного состояния выемочных выработок обеспечивают комбинацией рамной и анкерной крепей [82-84], а после прохода лавы в сочетании с комбинированными охранными системами [82, 85, 86].

Позитивный эффект опорно-анкерного крепления по упрочнению пород кровли не подвергается сомнению, однако он будет существенно выше при ограничении или полном исключении выдавливания пород в боках и почве выемочных выработок. Этот процесс в Западном Донбассе назван «эффектом штампа» [79, 80] и сущность его появления поясняется схемой на рисунке 5.1. Вне зоны влияния очистных работ «эффект штампа» обусловлен двумя факторами: формированием в кровле опорно-анкерной системы (армопородной плиты высокой жесткости), воспринимающей и передающей по-

вышенную нагрузку на нижележащие породы в боках выработки; размещением в боках выработки более крепкого и жесткого угольного пласта по сравнению с породами его непосредственной кровли и почвы. В зоне опорного давления впереди лавы «эффект штампа» усиливается с появлением асимметрии перемещений контура выработки в сторону выемочного участка. После прохода лавы действие жесткого угольного пласта на породы непосредственной почвы угольного пласта заменяется нагрузкой от охранной конструкции, которая способствует сдвигению пород бермы в полость выемочной выработки и асимметричному проявлению пучения ее почвы.

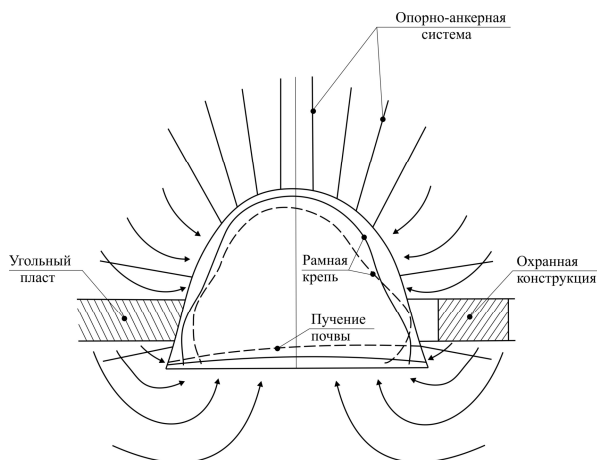


Рис. Схема развития «эффекта штампа» и деформирования рамной крепи впереди (—) и позади (---) очистного забоя

Ограничение действия «эффекта штампа» и повышение устойчивости выемочной выработки осуществляется установкой рамно-анкерной крепи в истинном понимании этого термина – рама и боковые анкера соединяются пространственно-податливыми механическими связями, позволяющими перераспределять нагрузку пропорционально несущей способности каждого элемента рамно-анкерной системы. Сущность процесса поясняется на рисунке 5.2, где отражена схема снижения максимумов  $M_i$  изгибающего момента в раме до уровня  $m_i$ , когда она подвержена реакции №1, 2 анкеров через пространственно-податливые связи. Снижение максимумов изгибающего момента тождественно увеличению несущей способности рамы, но не за счет роста ее металлоемкости, а путем приложения реакций №1, 2 анкеров на определенных участках по высоте стоек рамы.

Шахтные исследования и математическое моделирование [87] указывают на наиболее целесообразные участки установки анкеров в боках выемочных выработок: в почве угольного пласта – на высоте 0,2...0,5 м от почвы выработки; в кровле угольного пласта – на высоте 1,8...2,2 м от почвы выработки. Наличие пространственно-податливых связей в составе рамно-анкерной

крепи обеспечивает увеличение несущей способности рамы в 1,6...2,0 раза в вертикальном и в 2,5...3,5 раза в боковых направлениях, помимо упрочняющего эффекта неустойчивых боковых пород выемочных выработок непосредственно анкерами.

Значительные перемещения приконтурных пород выемочных выработок требуют согласования податливого режима работы рам и анкеров, в связи с

чем наиболее эффективно применение анкеров постоянного сопротивления, обеспечивающих автоматическое выполнение данного условия в сочетании с использованием конструкций пространственно-податливых связей элементов рамно-анкерной крепи.

В соответствии с геометрическими закономерностями развития проявлений горного давления по мере движения очистного забоя предусмотрена технология поэтапного возведения крепежной системы нарастающего сопротивления:

– в период проходки выемочной выработки по ее длине вне зоны влияния очистных работ (участок №1) возводится комбинированная крепежная система, включающая опорно-анкерное крепление в кровле и рамно-анкерную крепь с пространственно-податливыми связями четырех боковых анкеров с рамной трехзвеньевой податливой крепью минимального профиля СВП (для предусмотренного проектом типового сечения) и макси-

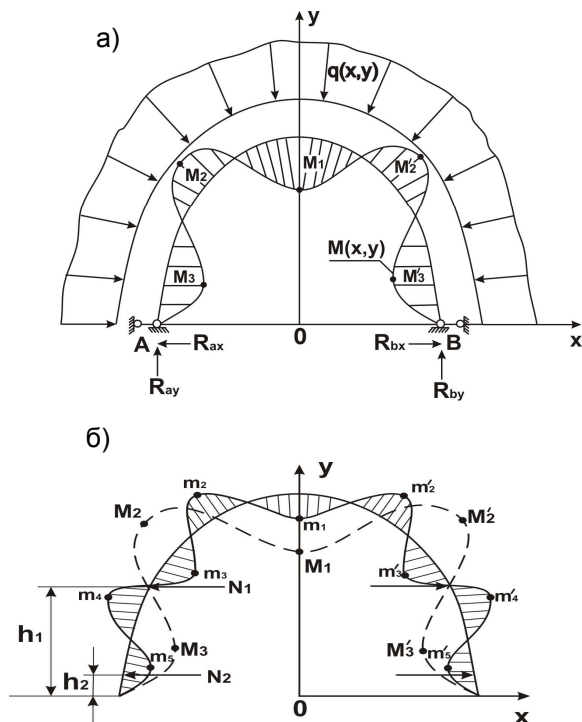


Рис. 5.2. К обоснованию принципа повышения несущей способности рамной крепи с помощью анкеров: а) общая схема нагружения рамы; б) схема понижения максимумов изгибающего момента: (---) до установки механических стяжек; (—) после установки гибких стяжек и создания рамно-анкерной крепи, как единой податливой грузонесущей конструкции

мального шага установки рам, что реализует стратегию ресурсосбережения в части противодействия и управления горным давлением преимущественно за счет регулирования параметров боковых анкеров;

– в зоне влияния очистных работ (опорного давления) впереди лавы (участок 2) производится установка податливых стоек крепи усиления (гидравлические стойки, податливые из спецпрофиля СВП и др). При необходимости (определяемой расчетом) увеличивается количество анкеров с пространственно податливыми связями, устанавливаемых в непосредственной кровле и почве угольного пласта со стороны выработанного пространства;

– позади лавы (участок 3) возводится охранный конструкция переменной жесткости для ограничения выдавливания пород бермы и почвы повторно используемой выемочной выработки;

– возможны три варианта технологии возведения комбинированной охранной конструкции: 1 – опорная часть литой полосы возводится методом «сухого» торкретирования на базе пневмобетономашин ПБМ – 2Э, 2 – гидромеханическим способом в индивидуальных полиэтиленовых сосудах и 3 – опорная часть возводится из железобетонных блоков в сочетании с органной деревянной крепью; приштрековая податливая часть комбинированной охранной конструкции возводится из деревянных костров, породокостров, стоек крепи под брус и т.д.;

– материал литой полосы: ангидритовая, фосфогипсовая, цементная смеси и другие, специально разработанные для этих целей быстротвердеющие смеси.

Выбирается базовая шахта и определяется выемочная выработка для проведения шахтных испытаний базовых схем крепления и охраны.

Первоначально разрабатывается, обосновывается и проходит испытания базовая конструктивно-технологическая комбинированная схема крепления и охраны повторно используемой выемочной выработки в условиях столбовой системы разработки, как в большей степени отвечающей требованиям работы высоконагруженной лавы.

Изложенная концепция технологического регламента управления горным давлением при поддержании повторно используемых выемочных выработок ресурсосберегающими технологиями обеспечит высокопроизводительную работу очистных комплексов при столбовой системе разработки угольных пластов в сложных условиях угольных шахт.

## **5.2. ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОРОДНОГО КОНТУРА ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК В ПРОЦЕССЕ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

Исследования проявлений горного давления в выемочных выработках шахт Западного Донбасса имеют историю, сопоставимую с началом освоения этого региона. Усложнение горно-геологических условий отработки угольных пластов за этот период принципиально не изменило качественную картину нарастания горного давления при приближении лавы к какому-либо фиксиро-

ванному сечению выемочной выработки и удалении от него. Эти закономерности таковы, что на некотором удалении сечения выработки от лавы ее влияние малосущественно; при приближении очистного забоя увеличивается интенсивность роста смещений породного контура и в зоне опорного давления достигает максимума (в районе сопряжения «лава-штрек»); после прохождения лавы скорость перемещений монотонно затухает и проявления горного давления стабилизируются на некотором удалении позади лавы. Следующей причиной развития возмущений горного давления в рассматриваемом (фиксированном) сечении повторно используемой выработки является отработка смежного выемочного участка. Причем, если вне зоны влияния второй лавы изменения в формировании нагрузки на крепь повторно используемой выемочной выработки касаются в основном длительных реологических процессов уплотнения обрушенных пород, уменьшения размеров породных блоков в кровле, деформаций ползучести пород кровли, боков и почвы и тому подобное, то при приближении лавы смежного выемочного участка рассматриваемое сечение попадает в зону ее опорного давления и процесс перемещения породного контура повторно используемой выемочной выработки существенно активизируется. Поэтому перечисленные этапы эксплуатации повторно используемой выемочной выработки должны быть отражены в механизме формирования перемещений породного контура, а, следовательно, и в специфике нагружения крепижной и охранной систем на отмеченных характерных участках, для объективного проведения исследований и выдачи обоснованных рекомендаций по обеспечению условий их поддержания.

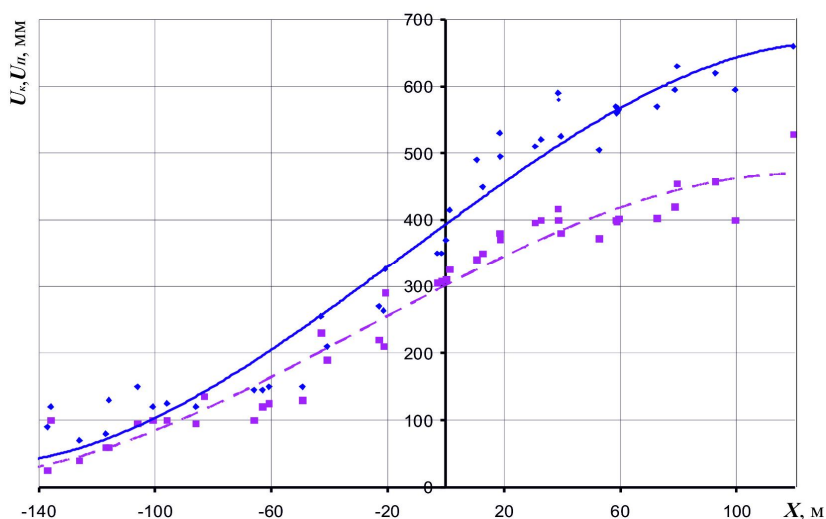


Рис. 5.3. Зависимости смещения кровли ( — ) и почвы ( - - - ) от расстояния  $X$  до очистного забоя в 159 штреке пласта  $C_6$  ПСП «Шахта «Степная»

Современные технологии поддержания выемочных выработок на шахтах Западного Донбасса характеризуются широким применением опорно-анкерного крепления [83-85], сущность которого заключается в формировании системой анкеров в кровле выработки армопородной плиты, воспринимающей основную часть нагрузки, весьма существенно ограничивая при этом опускание пород кровли и защищая рамную крепь от чрезмерного горного давления, преимущественно вертикального направления. Такая комбинация опорно-анкерного крепления с установкой рамной крепи, как наиболее прогрессивная грузонесущая крепежная система, была подвергнута анализу в части замеров перемещений породного контура выемочных выработок по мере подвигания очистного забоя. Инструментальные наблюдения проведены на ряде шахт Западного Донбасса (ПСП «Шахта «Степная», «Шахта «Терновская», «Шахта «Юбилейная»), отличающихся горно-геологическими условиями, что обеспечивает достаточную объективность анализа состояния выемочных выработок по Западному Донбассу в целом.

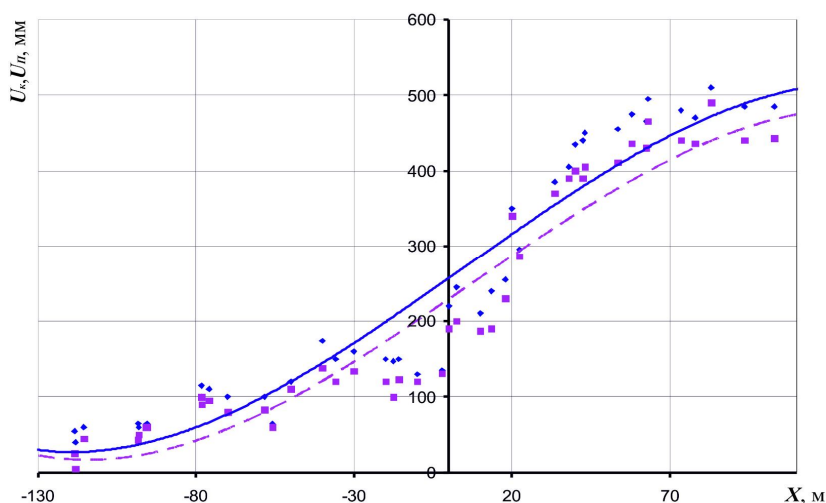


Рис. 5.4. Зависимости смещения кровли ( — ) и почвы ( - - - ) от расстояния  $X$  до очистного забоя в 163 штреке пласта  $C_6$  ПСП «Шахта «Степная»

Закономерности развития перемещений кровли и почвы в процессе подвигания очистного забоя по пласту  $C_6$  ПСП «Шахта «Степная» для двух выемочных выработок представлены на рис. 5.3 и рис. 5.4. Здесь четко прослеживаются три упомянутые выше стадии деформирования близлежащего массива и нагружения крепи при отработке первого выемочного участка. На расстоянии до 80...100 м от лавы опускание кровли  $U_K$  и подня-



тие почвы  $U_{II}$  не превышает, как правило, 70...100 мм и обусловлены изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) приконтурных пород, связанным с проведением выемочной выработки. На этом участке (вне зоны влияния очистных работ) обращает внимание тот факт, что поднятие (пучение) почвы всего до 15...25% меньше опускания кровли при близких значениях коэффициентов крепости пород непосредственной кровли и почвы; причем, породы последней на ряде участков выработки имеет сопротивление сжатию до полутора раз выше, чем породы непосредственной кровли. Причины данного явления требуют детального осмысления в части раскрытия механизма деформирования приконтурных пород вне зоны влияния очистных работ – здесь подтверждается, описанный в исследованиях [87] так называемый «эффект штампа», когда более крепкий и поэтому целостный угольный пласт, являясь более жестким телом, «выдавливает» (за счет вертикального горного давления) в полость выработки более слабые (с ярко выраженными пластическими и реологическими свойствами) породы непосредственной почвы.

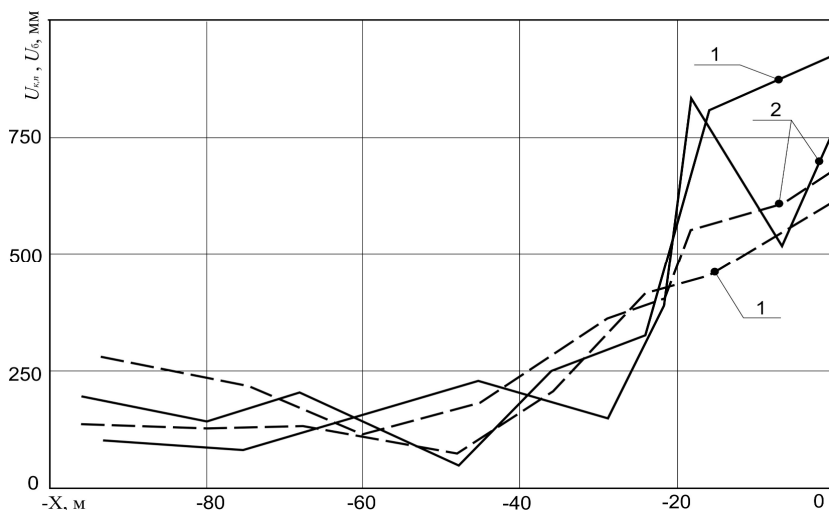


Рис. 5.5. Зависимости сближения кровли и почвы (—) и боков (---) выемочных выработок при подходе лавы по пласту  $C_5^g$  ПСП «Шахта «Терновская» (534 сборный штрек): 1 – реперная станция №1; 2 – реперная станция №2

Часть инструментальных наблюдений развития перемещений контура выемочной выработки на ПСП «Шахта «Терновская» представлены на рис. 5.5 и рис. 5.6. Следует отметить изменение механических характеристик близлежащих пород кровли и почвы в сторону снижения сопротивления

сжатию и увеличения разницы между крепостью угольного пласта  $C_5^g$  и пород непосредственной кровли и почвы. Поэтому, несмотря на ведение очистных работ на меньшей глубине ( $H = 230...380$  м) по сравнению с ПСП «Шахта» Степная», сближения кровли и почвы, а также боков выработки  $U_{\delta}$  развиваются как минимум не меньшей величины, а на некоторых участках превосходят таковые замеры на ПСП «Шахта «Степная».

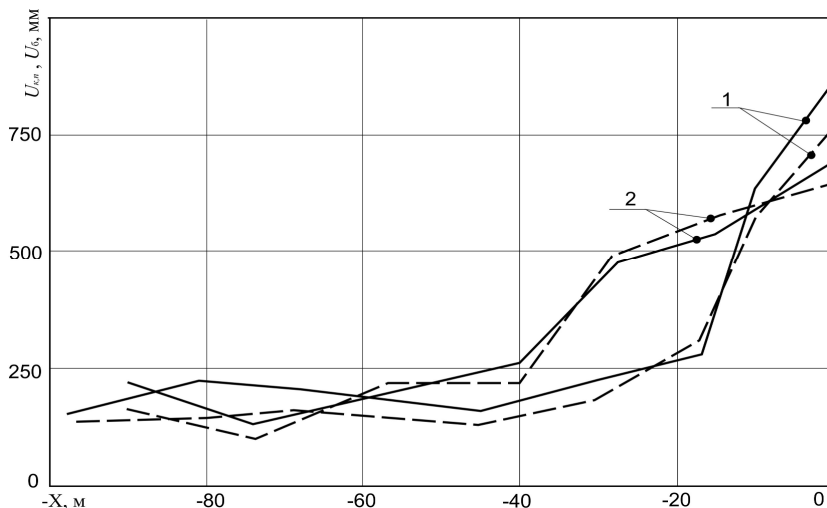


Рис. 5.6. Зависимости сближения кровли и почвы (—) и боков (---) выемочных выработок при подходе лавы по пласту  $C_5^g$  ПСП «Шахта «Терновская» (534 сборный штрек): 1 – реперная станция №3; 2 – реперная станция №4

Отмечается ряд особенностей развития перемещений по сравнению с предыдущими исследованиями. Так, влияние лавы начинает прослеживаться на более близком к забою расстоянии от 15...20 м до 30...40 м, то есть, зона опорного давления укорачивается по длине выемочной выработки, что обусловлено более высоким отношением жесткости угольного пласта и слабых пород кровли. С другой стороны, вне указанной зоны влияния очистных работ представляет интерес соотношение величины сближения кровли и почвы  $U_{K,П}$ , а также боков  $U_{\delta}$  выработки. В существующих нормативных документах [88, 89] отношение  $\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}}$  на пологих

пластах регламентируется в интервале 0,20...0,39. Замеры перемещений породного контура выемочных выработок показывают, что отношение

$\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}}$  не только приближается к единице (то есть, величины  $U_{K,П}$  и  $U_{\delta}$ , примерно, равны друг другу), но и на некоторых участках сближения боков превышают сближение кровли и почвы (см. рис. 5.5 и рис. 5.6). Данный факт также требует пояснения в плане обоснования механизма нагружения крепежной системы вне зоны влияния очистных работ и разработки на этой основе мероприятий по ограничению проявлений горного давления в боках выработки. Здесь, на наш взгляд, также проявляется «эффект штампа», но не касательно пучения почвы (как на ПСП «Шахта «Степная»), а по отношению к активным сдвигениям боков выработки. Также следует отметить, что величина перемещений  $U_{K,П}$  и  $U_{\delta}$  более существенна и достигает значений 200...280 мм вне зоны влияния очистных работ.

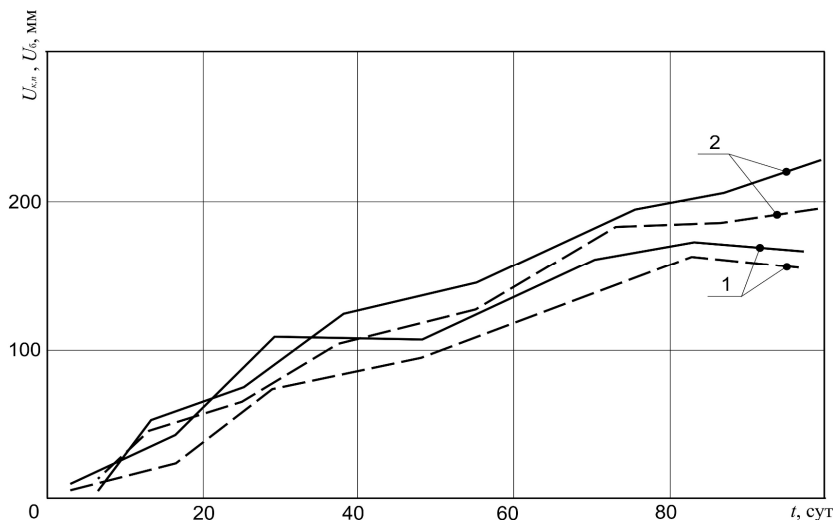


Рис. 5.7. Зависимости развития во времени сближения кровли и почвы (—) и боков (---) выработки вне зоны влияния очистных работ на ПСП «Шахта «Юбилейная» (139 сборный штрек): 1 – реперная станция №1; 2 – реперная станция №3

Еще одним подтверждением проявления «эффекта штампа» в выемочных выработках вне зоны влияния очистных работ при применении опорно-анкерного крепления является серия наблюдений, проводимых на ПСП «Шахта «Юбилейная», блок №3. Результаты показаны на рисунке 5.7. Выемочная выработка (139 сборный штрек) пока не попала в зону влияния очистных работ. Тем не менее, трехмесячные наблюдения показали довольно

высокую величину отношения  $\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}}$ , которая увеличивается по мере роста продолжительности наблюдений и, соответственно, перемещений породного контура. Так, если в первые две недели замеров  $\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}} = 59...87\%$ , то при

$t \geq 80$  сут.  $\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}} = 86...95\%$ . Это указывает на рост пластической состав-

ляющей в величине перемещений, при которой «эффект штампа» проявляется более интенсивно.

При подходе лавы к замерным станциям в выемочных выработках исследуемый участок попадает в зону опорного давления, где процесс перемещения породного контура значительно активизируется. Например, в выемочных выработках ПСП «Шахта «Самарская» перемещения увеличиваются (на участке сопряжения с лавой) до 3,5...4 раз в кровле ( $U_K$ ) и до

3...3,5 раз в почве ( $U_{П}$ ). В то же время отношение  $\frac{U_{П}}{U_K}$  по мере приближе-

ния лавы достаточно стабильно и изменяется в пределах 67...88% как вне зоны влияния очистных работ, так и в зоне опорного давления вплоть до сопряжения с лавой; причем большие значения в 78...88% характеризуются, как правило, участком до 20 м от сопряжения. То есть, можно утверждать, что процесс нарастания пучения почвы при приближении лавы происходит более интенсивно, чем увеличение опускания кровли – следовательно, по отношению к почве «эффект штампа» несколько усиливается в зоне опорного давления, что вполне объяснимо активизацией сдвижения пород кровли.

Аналогичная ситуация прослеживается и в выемочных выработках ПСП «Шахта «Терновская», где было отслежено соотношение сближения кровли и почвы  $U_{K,П}$  и боков выработки  $U_{\delta}$ . Здесь также наблюдается вполне прогнозируемый процесс увеличения  $U_{K,П}$  и  $U_{\delta}$  в зоне опорного давления: по параметру сближения кровли и почвы – в 3...4 раза; по параметру сближения боков – в 2,5...3,5 раза. Наблюдается относительная стабильность величины

$\frac{U_{\delta}}{U_{K,П}}$  на уровне 75...105%, что подтверждает присутствие явления выдавли-

вания боковых пород («эффект штампа») и в зоне опорного давления.

На ПСП «Шахта «Юбилейная» замерные станции пока не попали в зону опорного давления, но предыдущих двух примеров вполне достаточно, на наш взгляд, для обоснования такой особенности сдвижения массива в окрестности выемочных выработок шахт Западного Донбасса, как сформулированный нами «эффект штампа».

После прохода лавы скорость смещений породного контура выработки снижается, рост абсолютных значений перемещений замедляется и на неко-

тором удалении от лавы проявления горного давления стабилизируются, а определенное их развитие обусловлено исключительно длительными реологическими процессами изменения состояния подработанной толщи на больших площадях. За лавой основное внимание уделяется устойчивости пород бермы выемочной выработки, охраняемой тем или другим способом, и процессу пучения ее почвы, так как боковые породы непосредственной кровли теряют жесткое основание в виде угольного пласта и здесь на берму выработки действует концентрация опорного давления, передающаяся через охранную конструкцию не только на породы бермы, но и на породы почвы выработки. Здесь интенсифицируются проявления «эффекта штампа», что можно наблюдать на рисунке 5.4, когда перемещения пород кровли и почвы приближаются друг к другу, а отношение  $\frac{U_{\Pi}}{U_K}$  составляет 93...95%.

Объективности ради следует отметить, что в другой выемочной выработке (см. рис. 5.3) отношение  $\frac{U_{\Pi}}{U_K}$  несколько ниже (85...94%), но все равно составляет значительную величину.

Таким образом, экспериментальными исследованиями зафиксированы на разных шахтах Западного Донбасса в разных горно-геологических условиях неперенное присутствие активного выдавливания пород боков и почвы выработки (при применении опорно-анкерной крепи). Данное явление необходимо рассматривать в комплексе с процессом сдвижения надугольной толщи на концевых участках лавы, который также оказывает значительное влияние на состояние выемочных выработок.

### **5.3. ОСОБЕННОСТИ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ НА КОНЦЕВЫХ УЧАСТКАХ ЛАВЫ ВБЛИЗИ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК**

Экспериментальные исследования смещений контура выемочных выработок, поддерживаемых с применением комбинированной крепи в составе рамной и опорно-анкерной, убедительно показали доминирующее влияние очистных работ на состояние этих подготовительных выработок и перспективы их повторного использования. Данное утверждение не является новым, оно общеизвестно и многократно подтверждено мировой практикой угледобычи, а особенностью является то, что данные исследования проведены для слоистой углевмещающей толщи слабых пород Западного Донбасса при существующей технологии комбинированной крепи в составе опорно-анкерной и рамной крепей.

Для оценки влияния сдвижения надугольной толщи на концевых участках лавы и разработки механизма протекания этого процесса целесообразно использовать наиболее объективную информацию, полученную экспери-

ментальным путем. Для этого был проведен комплекс экспериментальных исследований по изучению процессов формирования нагрузки на концевые секции механизированной крепи в зависимости от геомеханических и технологических параметров очистной выемки.

Установлено, что вне зависимости от геомеханических и технологических параметров очистной выемки нет какой-либо стабильной закономерности изменения нагрузки на секции крепи по длине лавы, в том числе и на ее концевых участках. При различных координатах длины выемочного столба максимальная нагрузка на секции проявляется по длине лавы стохастически и ее неоднократно фиксировали как на центральных, так и на концевых участках лавы. Очевидно, это связано с изменением структуры надугольной толщи по длине лавы, которое чрезвычайно сложно отследить геологическими службами ввиду значительных расстояний между скважинами, на основании данных бурения которых строится горно-геологический прогноз. Данное предположение было проверено при вариации других параметров, влияющих на формировании нагрузки на секции крепи, и регулярная неоднозначность (в значительной степени произвольный характер) распределения нагрузки по длине лавы лишь подтверждают вывод о доминирующем влиянии структуры массива при прочих равных условиях.

Повышенное внимание к структуре надугольной толщи уделено по той простой причине, что процесс ее сдвижения затрагивает не только концевые секции механизированной крепи, но и приконтурные породы вокруг выемочной выработки, включая ее крепь. По сущности геомеханических процессов рассматривается единая система, где индикатором ее нагружения является давление  $P$  в поршневых полостях гидростоек концевых секций.

Общепринятым является положение о том, что фактором нагружения секций механизированной крепи является вес объема пород непосредственной кровли, обрушающихся сразу после их обнажения, но главным фактором – опускание породных слоев основной кровли, где нагрузка напрямую связана с длиной зависающих над секцией породных консолей. Это утверждение касается и концевых секций, но здесь необходимо рассматривать породные консоли в трехмерном представлении в виде породных плит с нежестким защемлением в глубине угольного пласта и опиранием на боковые приконтурные породы выемочных выработок. В этом плане представляет интерес экспериментальные исследования процесса формирования породных плит в основной кровле на концевых участках лавы с целью последующего использования результатов в разрабатываемом механизме формирования нагрузки на крепь выемочной выработки в районе сопряжения с лавой и позади нее.

Для выполнения данных исследований были отобраны пять участков с существенно разной структурой надугольной толщи на высоту в кровле 11...13 м: от преимущественно тонкослоистой до преимущественно крупнослоистой структур, представленных в основном аргиллитами и алевролитами. При этом четко прослеживается достаточная стабильность давления  $P$

в гидростойках (как эквивалент нагрузки на секции) в процессе движения лавы при преимущественно тонкослоистой структуре пород кровли. Это указывает на то, что сколь-нибудь существенных породных консолей не образуется за ограждением секций механизированной крепи, а процесс обрушения породных слоев по высоте происходит поэтапно, достаточно равномерно без проявлений возмущений горного давления, которые обычно предшествуют так называемой посадке основной кровли – данное явление как таковое практически отсутствует. В этой связи на концевых участках лавы логично рассматривать породную плиту (для каждого слоя), которая в поперечном сечении выемочной выработки на границе с выработанным пространством также будет обрушаться без зависания удлиненных консолей, а сразу же в приконтурных породах выработки. При крупнослоистой структуре пород кровли, несмотря на низкие прочностные характеристики аргиллитов и алевролитов, периодически наблюдаются возмущения давления в гидростойках концевых секций, что указывает на зависание породных консолей с последующим их периодическим обрушением, соответствующим шагу посадки основной кровли. Логично предположить, что на границе лавы и выемочной выработки (в ее поперечном сечении) также образуется плита с вылетом в выработанное пространство на некоторую длину. Хотя зафиксированное превышение среднего давления в гидростойках концевых секций составляет до 20...25%, тем не менее, уступообразный вылет породных плит по мощности основной кровли способен существенно увеличить нагрузку на крепь выемочной выработки и возводимую позади лавы охранную конструкцию, что снижает устойчивость бермы выработки и интенсифицирует пучение пород почвы.

Таким образом экспериментально установлено, что в пределах одного выемочного участка процесс формирования нагрузки на систему поддержания выемочной выработки может существенно отличаться; это обусловлено изменением структуры пород надугольной толщи. Отмеченные вариации проявлений горного давления необходимо не только отражать в механизме формирования нагрузки на крепь, но и в последующем этапе моделирования геомеханических процессов для более объективного и достоверного прогнозирования устойчивости выемочной выработки и обоснования мероприятий по обеспечению ее повторного использования.

Другой экспериментально установленной особенностью проявлений горного давления на концевых участках лавы является независимость нагрузки на секции механизированной крепи от глубины  $H$  разработки. Изменение глубины почти на 100 м (от  $H = 400$  м до  $H = 340$  м) практически не отразилось на величине давления  $P$  в гидростойках концевых секций. Здесь намеренно приведены данные для преимущественно крупнослоистой структуры, когда проявляется эффект посадки основной кровли, чтобы влияние глубины  $H$  отразить как можно существеннее. Тем не менее, гораздо большее колебание  $P$  вызывает положение концевых секций относительно сечения выемочной выработки, где происходит посадка основной кровли. От-

существование связи параметров  $P$  и  $H$  указывает на то, что процесс формирования нагрузки на концевые секции замыкается в некотором объеме пород основной кровли, который не зависит от глубины разработки, а гораздо более связан со структурой надугольной толщи и рядом других параметров. По аналогии можно предположить, что деформирующийся рядом объем неустойчивых пород, создающий нагрузку на крепежную и охранную системы выемочных выработок, также мало связан с глубиной разработки наряду с более тесной связью с другими параметрами, прежде всего, со структурой надугольной толщи. Объяснение этого явления лежит в плоскости специфических свойств пород Западного Донбасса, обладающих низкими прочностными и деформационными характеристиками, слабыми связями между слоями (или их практическим отсутствием), ярко выраженными реологическими свойствами; а легко деформирующийся массив склонен в наибольшей степени образовывать подобие свода естественного равновесия по проф. М.М. Протоджяконову; известно, что объем такого свода не зависит от глубины разработки.

Технологические параметры ведения очистных работ, такие как среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания очистного забоя, время  $t$  его остановки (простоя) и расстояние  $\delta$  концевых секций от груди забоя, играют существенную роль в формировании нагрузки на механизированную крепь очистного забоя. Эти закономерности таковы, что ограничивают или расширяют свод пород кровли, формирующий нагрузку на концевые секции. Аналогичные процессы затрагивают и рядом расположенные породы кровли над выемочной выработкой.

Поэтому механизм формирования нагрузки на крепежные и охранные системы выемочных выработок должен учитывать упомянутые технологические параметры ведения очистных работ.

Подводя итоги анализа результатов экспериментальных исследований в выемочных выработках и концевых участках лавы можно утверждать, что создана база данных особенностей проявлений горного давления на шахтах Западного Донбасса, которая является основой для разработки механизма формирования нагрузки на крепежные и охранные конструкции и проведения последующих исследований по разработке рекомендаций для повторного использования выемочных выработок.

#### **5.4. ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОСОБЕННОСТЕЙ МЕХАНИЗМА НАГРУЖЕНИЯ КРЕПЕЖНОЙ И ОХРАННОЙ СИСТЕМ И СДВИЖЕНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ СЛАБЫХ ПОРОД**

Раскрыты основные особенности геомеханики сдвижения надугольной толщи и механизма нагружения крепежной и охранной систем повторно используемых выемочных выработок в условиях отработки угольных пластов в



Западном Донбассе. Основные выводы и направления дальнейших исследований по реализации основной цели – обеспечение ресурсосберегающих условий повторного использования выемочных выработок сводятся к следующему.

1. Проведенные экспериментальные исследования процессов сдвижения углевмещающего массива в выемочных выработках и на концевых участках очистных забоев сформулировали регулярно пополняемую базу данных особенностей проявлений горного давления на шахтах Западного Донбасса, которая положена в основу созданного механизма нагружения крепижной и охранной конструкций как первого этапа исследований по созданию рекомендаций применения ресурсосберегающих технологий поддержания выемочных выработок при их повторном использовании.

2. Эффективность повторного использования выемочных выработок определяется выбором параметров их поддержания, основанном на объективном и достоверном отражении геомеханических процессов, учитывающем «историю нагружения» крепижной и охранной систем на протяжении всего периода эксплуатации выработки, начиная от ее сооружения до погашения после повторного использования. Выделено четыре стадии развития проявлений горного давления во времени поддержания выемочных выработок с обоснованием особенностей сдвижения надугольной толщи слоистого массива слабых пород, характерных для условий Западного Донбасса: вне зоны влияния очистных работ; в зоне опорного давления впереди первой лавы; позади очистного забоя, включая участок стабилизации горного давления; в зоне влияния очистных работ второй лавы вплоть до погашения выемочной выработки. Такой подход обеспечивает преемственность отражения механизма нагружения крепижной и охранной систем на разных участках выемочной выработки и взаимосвязь последующих рекомендаций по ее ресурсосберегающему поддержанию.

3. Экспериментальные исследования и многопараметрическое моделирование геомеханических процессов современными компьютерными технологиями зафиксировали на разных шахтах Западного Донбасса в разных горно-геологических условиях непереносимое присутствие активного выдавливания пород боков и почвы выработки (особенно при применении опорно-анкерного крепления), которое названо нами «эффект штампа». Данное явление раскрыто в созданном механизме развития нагрузки на крепижную систему как вне, так и в зоне влияния очистных работ, где «эффект штампа» рассматривается в комплексе с процессом сдвижения надугольной толщи на концевых участках лавы, который также оказывает влияние на состояние выемочной выработки. Разработан механизм ограничения негативного воздействия «эффекта штампа» как основа конструктивно-технологических решений повышения устойчивости боков и почвы выемочных выработок в сочетании с опорно-анкерной крепью.

4. Сформулирован комплекс взаимосвязанных задач исследований, вытекающих из основных положений механизма нагружения крепижной системы

выемочных выработок вне зоны влияния очистных работ, как первого периода их эксплуатации. Результатом решения данных задач наполняют конкретным содержанием ресурсосберегающую концепцию разработки типовых материалов для проектирования повторно используемых выемочных выработок.

5. формулированы рекомендации по принципам создания геомеханических моделей сдвига массива и нагружения крепежной системы в зоне влияния очистных работ. Обосновано, что частичное разупрочнение породных слоев надугольной толщи в виде их дискретной нарушенности в пространстве в областях растягивающих и высоких концентраций сжимающих напряжений приводит к увеличению объемов пород, подверженных активным деформациям, а их разделение на систему взаимодействующих плит интенсифицирует процесс выдавливания частично разупрочненного приконтурного массива в боках и почве выработки. Доказано влияния опускания кровли на концевых участках очистного забоя на процесс нагружения крепежной системы выемочных выработок. Также установлена связь этих процессов с рядом технологических параметров ведения очистных работ, протекающих не только в пространстве, но и во времени; поэтому закономерности развития нагрузки на крепежную систему наиболее объективно изучать в реологической постановке.

6. Обоснован алгоритм поэтапного совершенствования геомеханической модели в направлении повышения достоверности отражения реального процесса зарождения и развития дискретных нарушений в слоистой надугольной толще.

7. Повышение адекватности моделирования реальных процессов сдвига надугольной толщи в районе сопряжения лавы и выемочной выработки обусловлено пространственной постановкой задачи взаимодействия элементов геометрически неоднородной распорной системы из породных плит с разными механическими характеристиками. При этом необходимо учитывать, что геометрическая неоднородность и условия на границе системы непрерывно изменяют свои параметры в пространстве и времени по мере отхода очистного забоя.

8. На базе существующих шахтных исследований, результатов вычислительного эксперимента и моделирования на эквивалентных материалах разработано положение о том, что нагрузка на крепь очистного забоя, в том числе и концевых секций, формируется весом неустойчивых пород внутри свода, ограниченного со стороны забоя поверхностями зависающих породных консолей, а со стороны выработанного пространства – поверхностями изменения знака кривизны изгиба породных слоев при их опускании на нижележащие породы. Оба контура свода (со стороны забоя и выработанного пространства), помимо тесной связи с геомеханическими факторами, подвержены существенному влиянию технологических параметров – скорости продвижения очистного забоя и продолжительности его остановки. Эти закономерности еще раз подчеркивают необходимость реологической постановки задачи для достоверного отражения исследуемых геомеханических про-

цессов и выработки эффективных рекомендаций по поддержанию повторно используемых выработок.

9. По мере вступления в работу охранной конструкции по ее площади формируется высокое опорное давление, которое еще более усиливает асимметрию распределения нагрузки на крепежную систему, что резко снижает ее несущую способность. Более того, сама рамная крепь не предназначена для сопротивления высоким боковым нагрузкам, поэтому она нуждается в усилении в заданном направлении, что наиболее эффективно осуществлять, на наш взгляд, за счет создания рамно-анкерной крепи с пространственно-податливыми связями боковых анкеров и рам. Другим направлением повышения устойчивости выемочной выработки является управление эпюрой распределения нагрузки на крепежную систему за счет регулирования деформационно-силовой характеристики охранной конструкции в соответствии с особенностями проявлений горного давления.

10. Участок стабилизации проявлений горного давления характеризуется частичным нивелированием геостатических аномалий благодаря совместному действию факторов реологии, уплотнения и консолидации ранее разупрочненных пород над выработанным пространством, что облегчает работу крепежной и охранной систем. Поэтому представляется чрезвычайно важным обеспечение устойчивости выемочных выработок в районе их сопряжения с лавой, что является гарантией создания ресурсосберегающих перспектив их повторного использования.

11. Обоснована необходимость учета ряда закономерностей для объективного и достоверного моделирования геомеханических процессов при повторном использовании выемочных выработок:

- анизотропию деформационных характеристик обрушенных пород в виде функций расстояния до очистного забоя, а также падение модуля деформации обрушенных пород на несколько порядков;

- НДС обрушенных и уплотненных пород приближается к гидростатическому благодаря их высокой деформативности;

- снижение интенсивности проявлений горного давления в зоне влияния второй лавы, которое обусловлено частичным разупрочнением вмещающих выработку пород при проходе первой лавы; при этом степень снижения примерно одинакова в кровле, почве и боках выработки.

12. При приближении второй лавы разница в продолжительности действия возмущений горного давления на отрабатываемом и соседнем отрабатанном выемочных участках обуславливает реологическую закономерность изменения направления асимметрии нагрузки на крепежную систему в сторону второй лавы с общей тенденцией ее роста. Поэтому здесь прогнозируется интенсивное развитие косонаправленной и боковой нагрузки (в том числе и от «эффекта штампа»), для ограничения действия которой необходимо разработать мероприятия по повышению устойчивости боковых пород и усилению крепежной системы в соответствии с характером проявлений горного давления.

## 6. АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД ПРИ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

### 6.1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НАДУГОЛЬНОГО ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Проанализированы особенности механизма образования зоны I из слоев пород надугольной толщи, разбитых вертикальными трещинами в области растягивающих напряжений, которые формируют так называемую область шарнирно-блокового перемещения пород [90-93]. На рис. 6.1 показана качественная картина силового взаимодействия породного блока первого слоя зоны I мощностью  $m_1^I$  с породами зоны II беспорядочного обрушения, с одной стороны, и породным блоком второго слоя мощностью  $m_2^I$ , с другой. Исходя из классических представлений, деформационные свойства породного слоя не позволяют ему сохранить целостность при плавном опускании до величины начала контакта с разуплотненными и увеличенными в объеме обрушенными породами зоны II. Поэтому в породном слое в сечениях максимальных изгибающих моментов  $(C_1 - C'_1)$  и  $(D_1 - D'_1)$  возникают нормальные к напластованию трещины разрыва от действия растягивающих горизонтальных напряжений вследствие низкой сопротивляемости горной породы этому виду нагружения. В остальной (по мощности породного слоя  $m_1^I$ ) части сечения продолжают действовать сжимающие напряжения  $\sigma_x^I$ , за счет которых породный блок сохраняет некоторую сопротивляемость сдвигу надугольной толщи. При разрушении объема пород вблизи рассматриваемого сечения из-за стесненных условий деформирования сечение сохраняет остаточную сопротивляемость горному давлению, а образованный квазипластический шарнир позволяет породному блоку смещаться по оси Y на требуемую величину. Таким образом, из породных блоков образуется распорно-шарнирная система, обладающая определенной несущей способностью, величина которой в значительной мере зависит от локального поля напряжений в окрестности квазипластического шарнира.

Механизм образования и работы квазипластического шарнира, на наш взгляд, представляется следующим (рис. 6.2). При изгибе породного слоя зоны I мощностью  $m_1^I$  его нейтральная ось  $X_n$  смещается в сторону действия сжимающих напряжений  $\sigma_x^I$  по причине объективно существующего превышения модуля деформации породы на сжатие над модулем деформа-

ции на растяжение. На участке  $0 - Y_2$  напряжения  $\sigma_x^I$  отсутствуют вследствие образования трещины разрыва; на участке  $0 - Y_1$  действуют сжимающие напряжения  $\sigma_x^I$ , распределенные по закону, близкому к линейному [94] по координате  $Y$ , с максимумом  $\sigma_{x_1}^I$  на поверхности породного пласта  $Y_1$  (эпюра 1). На контакте породного слоя в вертикальном направлении действуют напряжения  $\sigma_{y_1}^I$  со стороны обрушенных пород зоны II. Если воспользоваться общепризнанной для горных пород теорией прочности Кулона-Мора [95], то максимальная величина напряжений  $\sigma_{x_1}^I$  составит

$$\sigma_{x_1}^I = \sigma_{сж}^I + \frac{1 + \sin \varphi^I}{1 - \sin \varphi^I} \sigma_{y_1}^I, \quad (61)$$

где  $\sigma_{сж}^I$  – предел прочности пород на сжатие первого породного слоя зоны I;  
 $\varphi^I$  – угол внутреннего трения породы.

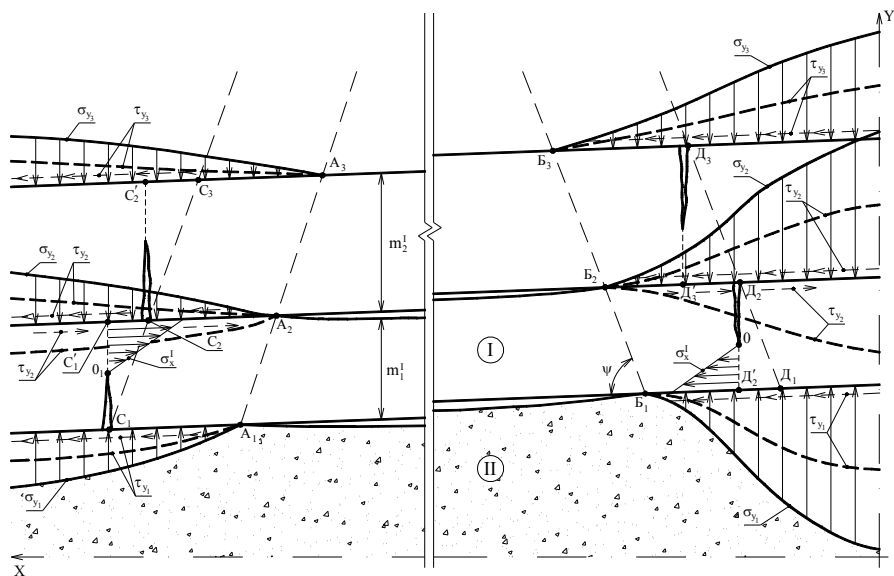


Рис. 6.1. К механизму деформирования шарнирно-блоковой распорной системы пород зоны I

При дальнейшем деформировании породного слоя под воздействием горного давления происходит его разрушение в области координаты  $Y_1$ . В пер-

**Рис. 6.2. Механизм образования квазипластического шарнира на границе породного блока зоны I**

Вторым параметром, характеризующим момент  $M$  сопротивления квази-пластического шарнира, является максимум горизонтальных напряжений ( $\sigma_{x_1}^I$ ), величину которого в первом приближении можно определить по методике [95] с учетом принципа совместности перемещений призм скола  $\Pi_i$  и контактирующих с ними пород зоны II.

Второй особенностью зоны I шарнирно-блокового перемещения пород является локальный контакт породных слоев друг с другом с образованием в центральной части пролетов блоков полостей между соседними породными слоями (см. рис. 6.1). С учетом не только вертикальных, но и горизонтальных подвижек пород надугольной толщи анализируемая особенность оказывает существенное влияние на параметры силового взаимодействия породных блоков, составляющих зону I.

В понятие локального контакта мы вкладываем взаимодействие первого породного блока с обрушенными породами зоны II и взаимодействие остальных (по мощности зоны I) породных блоков между собой в основном в окрестности квазипластических шарниров, являющихся границами этих блоков.

Общепризнанным является тот факт, что образование и раскрытие нормальных к напластованию трещин в области действия растягивающих напряжений происходит под углом полных сдвижений  $\psi$ , величина которого по Донбассу для пологих пластов оценивается в  $70-75^\circ$  (на рис. 6.1 показано пунктирными линиями  $C_1 - C_2 - C_3$  и  $D_1 - D_2 - D_3$ ). Отклонение от нормали к напластованию  $\psi$  очевидно связано с параметрами защемления породных слоев на границе с выработанным пространством.

Породные слои в зоне I формируют шарнирно-блоковую распорную систему последовательно от ближнего к зоне II породного слоя до дальнего на границе с зоной плавного опускания пород. При этом в каждом последующем породном слое сечение с трещиной, соответствующее максимуму изгибающего момента, перемещается в сторону выработанного пространства. Это обусловлено, на наш взгляд, нежестким защемлением породных слоев, вызванного интенсивным смещением и частичным разупрочнением пород в зоне действия опорного давления на границе с выработанным пространством.

Для более детального рассмотрения процесса проанализировано формирование нежесткого защемления для первого шарнирно-блокового породного слоя мощностью  $m_1^I$  (см. рис. 6.1). Породный слой, деформируясь под воздействием горного давления, начиная с точки  $B_1$ , испытывает реакцию  $\sigma_{y_1}$  со стороны обрушенных пород зоны II. Эта часть эпюры реакции  $\sigma_{y_1}$  отклоняется в сторону выработанного пространства в связи с повышенной деформативностью обрушенных пород зоны II. Суммарное действие напряжений  $\sigma_{y_1}$  создает изгибающий момент, направленный на повышение устойчивости породного слоя и передвигает максимум изгибающего момен-

та в сторону выработанного пространства.

Второй породный слой мощностью  $m_2^I$ , деформируясь совместно с первым слоем, испытывает аналогичные (в определенной степени) геомеханические процессы. Правее точки  $D_2$  (см. рис. 6.1) благодаря совместному вертикальному перемещению первого и второго слоев по плоскости их контакта, действуют нормальные напряжения  $\sigma_{y_2}$ . Левее точки  $D_2$ , благодаря повороту консоли первого слоя, контакт двух слоев должен исчезнуть и по линии  $D_2^I - D_2$  во втором слое будет образовываться квазипластический шарнир. Однако шахтные исследования [92, 96, 97] и моделирование на эквивалентных материалах [90, 91] показывают, что во втором породном слое квазипластический шарнир возникает по линии  $D_3^I - D_3$ , смещенной в сторону выработанного пространства относительно линии  $D_2^I - D_2$ . На наш взгляд, это обусловлено следующими причинами. С одной стороны, поворот породного блока первого слоя осуществляется не вокруг точки  $D_2$ , а вокруг точки 0 на нейтральной оси слоя (см. рис. 6.1 и 6.2). При этом некоторая часть поверхности первого слоя левее точки  $D_2$  будет перемещаться вверх, создавая на этом участке контакт со вторым породным слоем. С другой стороны, при образовании шарнирно-блоковой распорной системы в первом породном слое происходит его частичная разгрузка от горного давления, что также способствует перемещению поверхности породного блока первого слоя навстречу деформирующемуся второму породному слою.

Перечисленные факторы обеспечивают контакт слоев на участке  $B_2 - D_2$  и действие нормальных напряжений  $\sigma_{y_2}$ , которые преобразуют эпюру изгибающих моментов во втором слое таким образом, что максимум изгибающего момента перемещается в сторону выработанного пространства, где и происходит образование квазипластического шарнира второго породного слоя зоны I.

Аналогичные по физической сущности геомеханические процессы происходят на других торцах породных блоков слоев зоны I, расположенных в выработанном пространстве (см. рис. 6.1, линии  $C_1 - C_2 - C_3$ ,  $C_1 - C_1'$  и  $C_2 - C_2'$ ). В результате в зоне I образуется шарнирно-блоковая распорная система, имеющая определенную несущую способность и характеризующаяся локальным контактом соседних слоев в окрестности квазипластических шарниров, расположенных по высоте зоны I под углом полных сдвижений  $\psi$ . В первом приближении можно считать, что границы полостей между слоями (см. рис. 6.1, линии  $A_1 - A_2 - A_3$  и  $B_1 - B_2 - B_3$ ) также расположены под углом  $\psi$ , так как механизм их образования аналогичен механизму формирования локальных контактов в окрестности квазипластических шарниров.



Третьей особенностью зоны I шарнирно-блокового перемещения пород является развитие горизонтальных перемещений породных слоев относительно друг друга. В работах [90, 98] при моделировании на эквивалентных материалах и методом конечных элементов установлены закономерности горизонтальных сдвижений породных слоев надугольной толщи: породы непосредственной и основной кровли смещаются в сторону угольного пласта, причем величина смещений снижается при движении к дневной поверхности и на высоте  $(6...15)m_y$  мощностей угольного пласта направление горизонтальных перемещений породных слоев меняется на противоположное, то есть в сторону выработанного пространства. Механизм влияния горизонтальных перемещений породных слоев на их устойчивость рассмотрен с использованием схемы на рис. 6.1. Установлено, что горизонтальные смещения первого слоя (мощностью  $m_1^I$ ) зоны I в сторону угольного пласта больше, чем второго и составляют  $(0,05...0,30)m_y$  [90, 91, 98]. При такой величине перемещений соседних породных слоев друг относительно друга нарушается их связь и они взаимодействуют между собой по плоскости напластования только посредством сил трения  $\tau_{yi}(x)$ , возникающих за счет действия нормальных напряжений  $\sigma_{yi}(x)$  по плоскости  $i$ . Поскольку первый породный слой зоны I смещается в сторону угольного пласта, то со стороны обрушенных пород зоны II на него действуют реактивные касательные напряжения  $\tau_{yi}(x)$ , направленные в сторону выработанного пространства.

Суммарное действие касательных напряжений  $\tau_{yi}(x)$  на участке  $B_1 - D_2'$  создает момент относительно точки O поворота породного блока, направленный на удержание от дальнейшего перемещения в сторону обрушенных пород зоны II. Таким образом, благодаря касательным напряжениям  $\tau_{y1}$  создается так называемый «восстанавливающий» момент, повышающий устойчивость распорной шарнирно-блоковой системы первого породного слоя и увеличивающий, тем самым, сопротивление процессам сдвижения надугольной толщи.

На контакте первого и второго породных слоев зоны I также действуют касательные напряжения трения  $\tau_{y2}$ ; их направление воздействия на первый породный слой определяется преимущественной величиной горизонтального перемещения первого слоя по отношению к перемещению второго и показано на рис. 6.1. Касательные напряжения  $\tau_{y2}$  действуют в сторону выработанного пространства и их сумма по длине контакта  $B_1 - D_2$  создает момент относительно точки O (снижающий устойчивость породного блока первого слоя), который можно условно назвать «опрокидывающий». Соотношение «опрокидывающего» и «восстанавливающего» моментов зависит от координаты точки O и суммарных величин касательных напряжений, дей-

ствующих по линиям  $B_1 - D_2'$  и  $B_1 - D_2$  (см. рис. 6.1).

Для второго породного слоя (мощностью  $m_2^I$ ), как и для последующих слоев зоны I, момент от действия касательных напряжений  $\tau_{y_2}$  и  $\tau_{y_3}$  является только «опрокидывающим» в окрестности квазипластического шарнира со стороны угольного пласта (см. рис. 6.1), что обусловлено уменьшением и изменением направления горизонтальных перемещений породных пластов по высоте зоны I.

На границе породных блоков зоны I, расположенной со стороны выработанного пространства, касательные напряжения по плоскостям напластований также создают «опрокидывающий» и «восстанавливающий» моменты относительно точки  $O_1$  в первом породном слое. Во втором и последующих породных слоях момент является только «восстанавливающим» (см. рис. 6.1).

Рассмотренная особенность действия касательных напряжений, на наш взгляд, является фактором, увеличивающим длину контактов (например,  $C_2 - A_2$  и  $B_2 - D_2$ ) породных блоков соседних слоев: длина  $C_2 - A_2$  увеличивается за счет деформации породного блока второго слоя «восстанавливающим» моментом; длина  $B_2 - D_2$  увеличивается за счет изгиба породного блока «опрокидывающим» моментом. В результате квазипластические шарниры (по высоте зоны I) располагаются под углом  $\psi$  к плоскости напластования и свод зоны I на некотором расстоянии от угольного пласта замыкается, образуя разгруженную зону.

Подытоживая особенности механизма деформирования пород зоны I можно сделать три основных вывода, которые приняты во внимание при исследовании НДС надугольной толщи.

*Первый* – благодаря образованию квазипластических шарниров породные слои в виде распорной шарнирно-блоковой системы сохраняют часть несущей способности и оказывают сопротивление горному давлению.

*Второй* – процессы образования квазипластических шарниров, локальных контактов и полостей между породными слоями должны рассматриваться во взаимосвязи с учетом влияния зон опорного давления и разгрузки, что требует введения дополнительных условий и критериев в ходе расчета НДС рассматриваемой системы в целом.

*Третий* – ограничение высоты зоны I обосновывается образованием свода той или иной формы, геометрические параметры которого вытекают из результатов расчета НДС системы. На процесс формирования свода влияние оказывают все особенности деформирования зоны I: момент от квазипластического шарнира, усилия подпора за счет поворота и разгрузки нижележащего породного блока, момент от действия касательных напряжений трения в зонах локальных контактов по плоскостям напластования породных слоев.

## 6.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОНЫ ШАРНИРНО-БЛОКОВОГО СДВИЖЕНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) породных слоев надугольной толщи с использованием метода конечных элементов выполнен по эпюрам горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ , полученных при 30 вариантах расчета с изменением модуля деформации породных слоев в 10 раз (с  $0,2 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^4$  МПа) и различной их комбинации, из которых следует ряд общих черт деформирования слоев надугольной толщи.

Во-первых, эпюры  $\sigma_x$  в каждом слое пород надугольной толщи наглядно иллюстрируют процесс их изгиба с образованием максимумов сжимающих и растягивающих напряжений на поверхностях каждого слоя в двух характерных зонах: опорного давления впереди очистного забоя и над выработанным пространством, где опускание породных слоев достигает максимума, что определяет границу зоны полных сдвижений.

Во-вторых, максимумы сжимающих и, особенно, растягивающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  указывают на координаты появления, в первую очередь, вертикальных трещин разрыва в породном слое, а затем и образования квазипластических шарниров, формирующих зону шарнирно-блокового сдвижения. В этой связи общими чертами являются:

- в зоне опорного давления максимумы  $\sigma_x$  располагаются в районе действия максимумов  $\sigma_y$  и смещаются в сторону очистного забоя по мере движения к дневной поверхности;

- над очистным забоем четко выражена линия изменения знака кривизны изгиба породных слоев, являющаяся границей зоны опорного давления и имеющая наклон в сторону выработанного пространства;

- в выработанном пространстве линия расположения максимумов  $\sigma_x$  имеет некоторый наклон в сторону очистного забоя, что свидетельствует об уменьшении длины пролета породных блоков и ширины полостей между слоями по мере движения к дневной поверхности.

В-третьих, общая тенденция такова, что максимумы растягивающих и сжимающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  гораздо выше по абсолютной величине в более жестких породных слоях вне зависимости от их расположения по отношению к угольному пласту.

В-четвертых, породные слои непосредственной кровли и угольный пласт впереди очистного забоя весьма чувствительны к колебаниям жесткости слоев углевлещающей толщи и ее строению по этому фактору, что выражается не только в существенном количественном изменении компоненты  $\sigma_x$ , но и в качественной эпюре ее распределения.

Установленные общие закономерности распределения горизонтальных

напряжений  $\sigma_x$  предполагают и существенные отличия, обусловленные разной структурой (по фактору жесткости) углевмещающего породного массива. В первую очередь отмечено, что максимумы растягивающих напряжений  $\sigma_x$  составляют в среднем 50-100 МПа с интервалом изменения от 21 до 317 МПа. Вполне очевидно, что при таком уровне растягивающих напряжений  $\sigma_x$  в породных слоях обязательно произойдет образование трещин разрыва, которые ориентированы перпендикулярно к плоскости напластования.

Максимумы сжимающих напряжений  $\sigma_x$  располагаются на противоположной поверхности породного слоя и, как правило, несколько смещены (относительно максимума растягивающих напряжений  $\sigma_x$ ), отражая общие тенденции линий наклона максимумов  $\sigma_x$  в зоне опорного давления и в выработанном пространстве. Величина максимума сжимающих напряжений  $\sigma_x$  изменяется от 64 до 299 МПа и является, как правило, разрушающей для пород слабых и средней крепости, которые преимущественно представляют углевмещающую толщу Донбасса. Таким образом, в области действия сжимающих напряжений также наиболее вероятно образование квазипластического шарнира. В целом, уровень растягивающих и сжимающих максимумов компоненты  $\sigma_x$  не оставляет сомнений в образовании квазипластических шарниров, разделяющих породные слои на отдельные блоки в зоне шарнирно-блокового сдвижения. Поэтому по линиям расположения максимумов  $\sigma_x$  можно судить о закономерностях изменения длины блоков по высоте указанной зоны.

Кроме отмеченных фактов шахтными и лабораторными исследованиями установлено явление зависания породных консолей над выработанным пространством ступенчатой формы. Линия наклона этих консолей в сторону выработанного пространства однозначно связывается исследователями с геометрическим местом точек изменения знака кривизны изгиба породных слоев, которая также приурочивается к границе зоны повышенного давления над выработанным пространством. Таким образом, в модели по координате  $X$  образуются две группы породных блоков:

- над выработанным пространством от координат максимумов  $\sigma_x$  до координат изменения знака кривизны изгиба породных слоев (группа А);
- в зоне опорного давления от координат изменения знака кривизны изгиба породных слоев до координат максимумов  $\sigma_x$  (группа Б).

Если расширять модель в сторону выработанного пространства, то там будут располагаться, примерно, одинаковой длины породные блоки зоны шарнирно-блокового сдвижения, которые не оказывают существенного влияния на НДС в окрестности очистного забоя.

Далее проанализированы размеры породных блоков данной зоны в зависимости от соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи, что необходимо при последующем моделировании зоны

шарнирно-блокового сдвижения. Угол наклона  $\psi$  линии изменения знака кривизны изгиба породных слоев над очистным забоем и выработанным пространством большинство исследователей оценивают  $\psi = 70...74^\circ$  на пологих пластах вне зависимости от структуры и крепости пород надугольной толщи. На исследованных эпюрах горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  геометрическое место точек изменения знака кривизны можно четко установить по координатам  $X$  изменения знака горизонтальных напряжений по одной и той же поверхности произвольного породного слоя зоны. Установлено, что угол  $\psi$  характеризуется достаточным постоянством: вне зависимости от соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи величина  $\psi$  изменяется в узком диапазоне от  $72$  до  $76^\circ$ . Таким образом, с достаточной точностью можно принять угол расположения зависающих породных консолей над выработанным пространством постоянным и равным  $74^\circ$ .

С другой стороны, большинство исследователей утверждают, что процесс послойного образования зоны шарнирно-блокового сдвижения во многом определяет формирование нагрузки на крепь очистного забоя. Поэтому представляется чрезвычайно важным оценить размеры блоков в зоне и закономерности их связи с соотношением модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи.

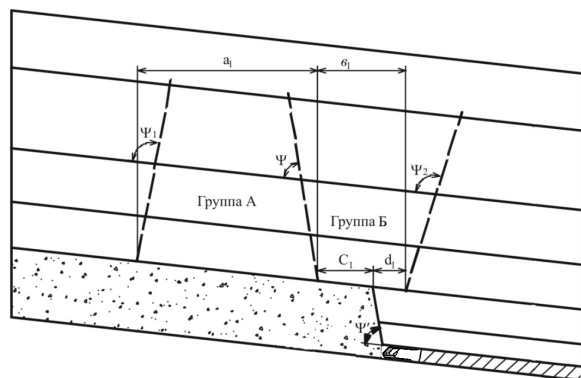


Рис. 6.3. Схема к определению длины блоков в зоне шарнирно-блокового сдвижения пород надугольной толщи вблизи очистного забоя

Анализ общих черт эпюр распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  позволил сформировать схему (рис. 6.3) к расчету длины  $a_i$  первой группы блоков А над выработанным пространством (длина блока первого породного слоя  $a_i$ ) и длины  $b_i$  второй группы Б блоков в зоне опорного давления вблизи очистного забоя. Размеры всех блоков в зоне шарнирно-блокового сдвижения будут известны, если будут установлены длины  $a_i$

и  $b_i$  блоков в первом породном слое  $m_1^I$  и углы  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , ограничивающие размеры блоков при движении к дневной поверхности.

Таким образом, поставлена задача выявления закономерностей изменения перечисленных параметров от соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи, что является обязательным этапом

для обоснованного моделирования процессов деформирования зоны шарнирно-блокового сдвижения.

Анализ размеров блоков зоны выполнен, начиная с угла  $\psi_1$  (см. рис. 6.3), являющегося их границей со стороны выработанного пространства. Очевидно, чем больше угол  $\psi_1$ , тем меньше длина блоков первой группы А (над выработанным пространством). Увеличение угла  $\psi_1$  объясняется более близким расположением к очистному забою максимумов  $\sigma_x$ , что связано с более интенсивным изгибом слоев  $m_2^I$  и  $m_3^I$ , когда одновременно оба породных слоя в непосредственной кровле ( $\psi_1 = 103^\circ$ ) или также в первом слое основной кровли ( $\psi_1 = 105^\circ$ ) имеют пониженную жесткость. Тогда верхние  $m_2^I$  и  $m_3^I$  более жесткие слои при своем деформировании в выработанное пространство имеют меньшую реакцию отпора со стороны нижних ( $m_1^I$ ,  $m_1^{II}$ ,  $m_2^{II}$ ) податливых слоев, нагрузка на жесткие слои увеличивается, они изгибаются более интенсивно, что перемещает максимум изгибающего момента ближе к месту защемления жесткого породного слоя.

Варианты однородного (по величине модуля деформации) сложения породных слоев надугольной толщи имеют угол  $\psi_1$ , практически перпендикулярный к плоскости напластования. Для некоторых вариантов расчета характерен угол  $\psi_1$ , несколько превышающий  $90^\circ$ , что связано, на наш взгляд, с расположением в непосредственной кровле второго слоя  $m_2^{II}$  пониженной жесткости. Это уменьшает сопротивление изгибу вышележащих слоев основной кровли и максимум  $\sigma_x$  перемещается в сторону очистного забоя. Когда в непосредственной кровле залегает второй породный слой повышенной жесткости, он с большей реакцией воздействует на слои основной кровли, снижая интенсивность их изгиба, и максимум  $\sigma_x$  перемещается в сторону выработанного пространства. Когда в непосредственной кровле располагаются исключительно жесткие слои, их повышенная реакция на слои основной кровли еще более повышает сопротивляемость изгибу последних и максимумы  $\sigma_x$  продолжают смещаться в сторону выработанного пространства ( $\psi_1 = 80...81^\circ$ ). Что касается угла  $\psi$ , то, как отмечалось ранее, его с достаточной точностью можно принять постоянным и равным  $\psi = 74^\circ$ .

Последующие исследования на разных глубинах разработки угольного пласта также показали практически постоянные значения  $\psi$ . Угол  $\psi_2$  характеризует месторасположение максимумов  $\sigma_x$  по высоте надугольной толщи в зоне опорного давления. Он не имеет сколь-нибудь значительной связи с соотношением модулей деформации породных слоев, слагающих надуголь-

ную толщину. Так, для просчитанных 30 вариантов при  $H = 400$  м угол  $\psi_2$  имеет достаточно узкий диапазон колебания от  $98$  до  $104^\circ$  без наличия какой-либо устойчивой тенденции его изменения при вариации параметров  $E_i^{I,II}$ . Очевидно, это связано с общеизвестными факторами стабильного перемещения максимумов опорного давления в сторону нетронутого угольного пласта по мере движения к дневной поверхности. Поэтому принято постоянство угла  $\psi_2$  вне зависимости от структуры пород надугольной толщи со средним значением  $\psi_2 = 101^\circ$ .

Закономерности влияния соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи на величину  $a_1/m_y$  пролета породного блока первой группы А в первом породном слое основной кровли следующие (см. рис. 6.3). Анализ эпюр  $\sigma_x$  показал, что основное влияние здесь оказывает соотношение жесткостей породных слоев основной кровли. При повышенной жесткости двух вышележащих слоев ( $m_2^I$  и  $m_3^I$ ) по сравнению с первым слоем  $m_1^I$  основной кровли первые воспринимают на себя повышенную нагрузку и защищают слой  $m_1^I$ , который, находясь в частично разгруженном состоянии, менее подвержен изгибающим усилиям. Поэтому максимум  $\sigma_x$  в первом податливом слое  $m_1^I$  отодвигается в сторону выработанного пространства и длина  $a_1/m_y$  блока в первом породном слое увеличивается до  $a_1/m_y = 19,1$ . При пониженной жесткости слоев  $m_2^I$  и  $m_3^I$  они, интенсивно изгибаясь, опираются на более жесткий слой  $m_1^I$ , который воспринимает на себя основную часть нагрузки. Поэтому наблюдается более интенсивный изгиб первого слоя основной кровли и максимум  $\sigma_x$  перемещается в сторону очистного забоя: длина  $a_1/m_y$  уменьшается до 13,7.

Длина  $e_1/m_y$  блока второй группы Б первого породного слоя состоит из двух частей (см. рис. 6.3): длины  $C_1/m_y$  консоли, зависящей над очистным забоем, и длины  $d_1/m_y$  участка от точки защемления консоли до точки расположения максимума  $\sigma_x$  в зоне опорного давления.

Что касается численных значений длины консоли  $C_1/m_y$ , то установлено, что она практически не зависит от соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи: среднее значение  $C_1/m_y$  составляет 4,36 с диапазоном колебаний от 3,92 (-10,1%) до 4,67 (+10,7%). Это связано со стабильностью угла  $\psi$  изменения знака кривизны изгиба породных слоев, который (при последующем образовании квазипластических

шарниров) характеризует угол зависания породных консолей основной кровли вблизи очистного забоя.

Таким образом, обосновано постоянство длины  $C_1 / m_y$  консоли первого породного слоя основной кровли вне зависимости от деформационных характеристик слоев углевмещающей толщи, которая изменяется в интервале  $C_1 / m_y = 4 \dots 4,5$ .

Как отмечалось ранее, длина  $e_1 / m_y$  блока второй группы Б в первом породном слое основной кровли включает также участок  $d_1 / m_y$  от точки защемления консолей  $C_1 / m_y$  до точки максимума  $\sigma_x$  в зоне опорного давления (см. рис. 6.3).

В ходе анализа установлено определенное влияние на параметр  $d_1 / m_y$  соотношения деформационных характеристик породных слоев надугольной толщи. Максимальная величина  $d_1 / m_y = 3,9$  наблюдается для варианта, когда в непосредственной кровле залегают только податливые слои, а в основной – только жесткие. Это объясняется, на наш взгляд, низким отпором податливых слоев, способствующих более интенсивному изгибу жестких слоев основной кровли в глубине угольного пласта, куда перемещается максимум  $\sigma_x$ .

В прямо противоположном варианте залегания в непосредственной кровле только жестких слоев, а в основной – только податливых, максимум  $\sigma_x$  стремится к точке защемления консолей, а иногда и проходит ее  $d_1 / m_y = -0,3$ . По результатам этих исследований получены уравнения регрессии:

– угол расположения трещин в системе породных блоков группы А не зависит от глубины разработки и определяется по формуле

$$\psi_1 = 90^\circ + \left( 0,36 E_1^I + 0,31 E_2^I + 0,23 E_3^I + 0,10 E_4^I - 0,34 E_1^{II} - 0,66 E_2^{II} \right) \cdot 8,6 \cdot 10^{-4}, \text{ град}; \quad (6.2)$$

– относительная длина нижнего породного блока группы А

$$\frac{a_1}{m_y} = 12,6 + 0,75 \cdot 10^{-4} \cdot (E_2^I + E_3^I - E_1^I); \quad (6.3)$$

– относительная длина нижней породной консоли породных блоков группы Б

$$\frac{C_1}{m_y} = 4,5; \quad (6.4)$$

– относительная длина нежесткого защемления нижнего породного бло-



ка группы Б

$$\frac{d_1}{m_y} = 1,5 + \left[ 1,1E_1^I + 0,82E_2^I + 0,68E_3^I - 1,01E_1^{II} - 1,58E_2^{II} + \right. \\ \left. + 0,39(1,5E_1^{II} + 1,5E_2^{II} - E_1^I - E_2^I - E_3^I) \sqrt{\frac{H}{200}} \right] \cdot 10^{-4}; \quad (6.5)$$

– угол полных сдвижений пород постоянен при различных соотношениях геомеханических параметров системы и равен  $\psi = 74^\circ$ ;

– угол расположения трещин в системе породных блоков группы Б постоянен при различных соотношениях геомеханических параметров и равен  $\psi_2 = 101^\circ$ .

Таким образом, анализ общих черт эпюр распределения компонент поля напряжений позволил обосновать схему строения зоны шарнирно-блокового сдвижения породных слоев надугольной толщи в окрестности очистного забоя, которая отличается разделением на различные группы в соответствии с распределением опорного давления. Выделены две группы блоков: над выработанным пространством и в зоне опорного давления. Выявлены тенденции изменения геометрических параметров этих групп породных блоков в зависимости от глубины разработки и соотношения модулей деформации породных слоев углевмещающей толщи.

### 6.3. ОСОБЕННОСТИ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В ЗАПАДНОМ ДОНБАССЕ

Проблемами состояния горного массива при отработке угольных пластов, закономерностями распределения напряжений и деформаций вокруг очистных выработок занимались и занимаются широкий круг ученых и специалистов [90-93, 96-121]. В результате сложился комплекс взаимосвязанных положений об основных процессах сдвижения углевмещающего массива и их параметрах. Эти фундаментальные положения, выработанные на протяжении многих десятилетий изучения поведения массива, служат основой для разработки механизма взаимодействия крепи механизированного комплекса с вмещающим массивом с учетом специфики горно-геологических условий Западного Донбасса. Рассмотрим основные особенности слабометаморфизированной угленосной толщи пород Западного Донбасса применительно к очистным работам.

Углевмещающий породный массив Западного Донбасса представлен слабыми литологическими разностями, коэффициент крепости которых зачастую в несколько раз ниже коэффициента крепости угольных пластов; кро-

ме того, практически повсеместно наблюдается трещиноватость пород кровли и почвы интенсивностью от 1-2 тр./м до 4-5 тр./м, что снижает их расчетное сопротивление сжатию в 1,5-2,5 раза согласно [89]. Здесь следует также учесть и высокую вероятность обводненности пород кровли и почвы, что снижает расчетное сопротивление сжатию алевролитов на 40%, а аргиллитов на 50% [89]. Совместное действие указанных факторов приводит к распространенной ситуации, когда сопротивление сжатию пород кровли и почвы (представленных в основном аргиллитами и алевролитами) в 2-5 раз и более ниже сопротивления сжатию угольного пласта.

В некоторой степени отмеченная особенность касается и соотношений деформационных характеристик вмещающих пород и угольного пласта. Здесь основная механическая характеристика – модуль деформации – обычно для алевролитов выше, а для аргиллитов сравнима с угольным пластом; однако, следует учитывать ослабляющие породу факторы трещиноватости и, особенно, увлажненности. Что касается трещиноватости, то уголь также подвержен ее воздействию, но сам угольный пласт находится, как правило, в условиях сложного нагружения сжимающими усилиями, а породы основной и непосредственной кровли испытывают деформации изгиба (особенно вблизи очистного забоя) с воздействием значительных растягивающих напряжений как вертикального, так и горизонтального направления. В то же время известно, что модуль деформации горной породы при растяжении многократно (до 8-10 раз согласно [91]) ниже, чем при сжатии; а трещиноватость массива снижает его деформационные характеристики как минимум на порядок [122-124]. Следовательно, по фактору трещиноватости при деформациях изгиба породы кровли и отчасти почвы резко снижают свои деформационные характеристики. Фактор увлажнения в гораздо большей степени влияет на аргиллиты и алевролиты, склонные к размоканию, чем на угольный пласт, что еще более снижает деформационные характеристики пород кровли и почвы по сравнению с угольным пластом. К сказанному следует добавить и ярко выраженные реологические свойства слабых пород Западного Донбасса, которые снижают длительный модуль деформации до двух раз. В совокупности воздействие перечисленных факторов приводит к ситуации многократно повышенной деформируемости пород кровли и почвы по сравнению с угольным пластом.

Приведенные особенности соотношений механических свойств угольного пласта и пород кровли некоторым образом преобразуют традиционную схему сдвига надугольной толщи на пологих пластах Западного Донбасса [90-92, 100, 104, 118-121]. Начнем с зоны опорного давления впереди очистного забоя – по данным существующих исследований опорное давление начинает проявляться в выемочных штреках на расстоянии от 20...30 м до 150...200 м впереди лавы, а максимум концентрации вертикальных напряжений  $\sigma_y = (1,5...8,5)\gamma H$  располагается на расстоянии  $l_1 = 2...15$  м от забоя в зависимости от механических характеристик углевмещающей толщи и технологических параметров очистных работ (рис. 6.4). Крепкие угли Западного Донбасса достаточно устойчивы к восприятию опорного давления, так как их

сопротивление сжатию  $\sigma_{сж} = 30...45$  МПа многократно превышает исходные вертикальные напряжения  $\sigma_y = \gamma H = 5...13$  МПа при существующей глубине  $H$  ведения горных работ. В зоне максимального действия опорного давления снова прогнозируется целостность пласта, поскольку он находится в объемном неравномерном напряженном состоянии от действия также сжимающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ , при котором сопротивление вертикальным усилиям  $\sigma_y$  повышается в 2,0...2,5 раза и более. То есть, даже с учетом высоких значений концентраций  $\sigma_y$  в опорной зоне маловероятно существенное разупрочнение пласта, что подтверждают как результаты компьютерного моделирования, так и слабо выраженный отжим угля в очистном забое или его практически полное отсутствие. В этом плане обособленное выше сочетание крепкого неразупрочненного угольного пласта и слабых легкодеформирующихся пород кровли приводит к тому, что максимум и вся зона опорного давления перемещаются к очистному забою. Установленные ранее закономерности при моделировании сдвижения надугольной толщи подтверждают этот вывод, который также не противоречит существующему мнению известных ученых и специалистов. Механизм явления концентрации зоны опорного давления в районе очистного забоя (см. рис. 6.4, пунктирная линия) при жестком пласте и легкодеформирующейся кровле пояснен на рис. 6.5 и процесс его протекания представляется таковым. Схематично выделив линию изгиба по нейтральной оси произвольного слоя кровли, рассмотрены два варианта:

– жесткость угольного пласта (за основной показатель при одинаковой мощности взят его модуль деформации  $E_y$ ) значительно меньше жесткости ( $E_{II}$ ) породного слоя кровли;

– жесткость угольного пласта существенно выше жесткости породного слоя кровли.

*Первый вариант:* зависающая породная консоль создает повышенную нагрузку в краевой части угольного пласта, где наблюдаются значительные вертикальные перемещения  $y(x)$  благодаря пониженному модулю деформации  $E_y$ . По этой же причине (низкий  $E_y$ ) вертикальная реакция  $\sigma_y(x)$  вблизи забоя будет относительно невысока, а пригруз от зависающей породной консоли также невелик из-за повышенной жесткости данного породного слоя и повышенной жесткости вышележащих слоев – нагрузка от вышележащих слоев снижается благодаря появлению полостей на контактах зависающих консолей смежных породных слоев, которые благодаря достаточной жесткости имеют пониженное перемещение в выработанное пространство. Податливые свойства угольного пласта пониженной жесткости усиливаются его частичным разупрочнением в призабойной части, поэтому и без того низкая реакция отпора  $\sigma_y(x)$  еще больше уменьшается. Пониженная

реакция в краевой части угольного пласта должна компенсироваться повышенной реакцией в его заглубленной части исходя из условия равновесия состояния массива. При удалении в глубь пласта его напряженное состояние преобразуется в объемное неравнокомпонентное, при котором как модуль деформации, так и сопротивление сжатию многократно увеличивается и растет отпор горному давлению. На этом же участке снижается расслоение пород кровли, исчезают полости между смежными слоями и каждый из них передает (на нижележащий массив) не только нагрузку от собственного веса, включая консольную часть, но и нагрузку от веса вышележащих слоев за счет контакта между ними. Таким образом, вертикальные напряжения  $\sigma_y(x)$  увеличиваются до такой величины, чтобы суммарная нагрузка в зоне опорного давления соответствовала исходной равномерно распределенной нагрузке  $\gamma H$  с учетом площади выработанного пространства; поскольку зона опорного давления распространяется в глубь массива на достаточно большое расстояние (по координате  $X$ ), то ее максимум  $(\sigma_y)_{max}$  должен быть относительно небольшим исходя из того же условия равновесного состояния углевмещающего массива.

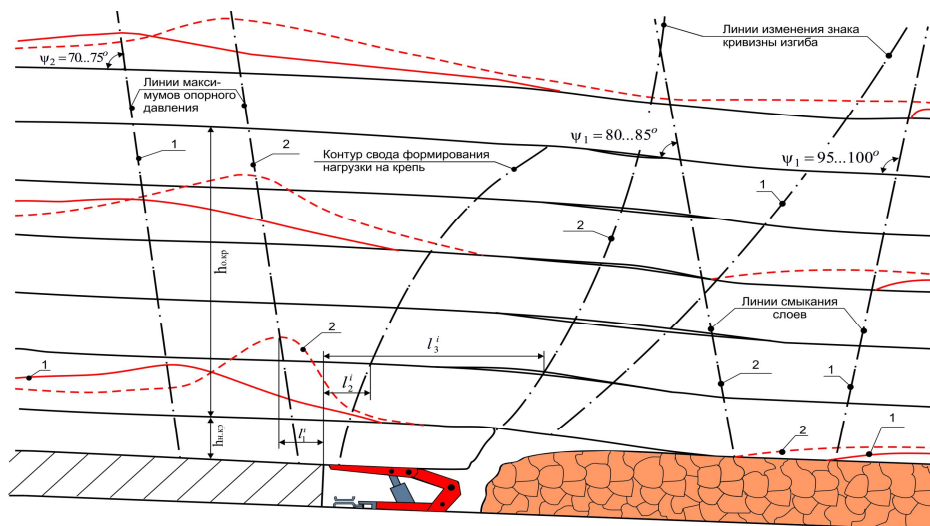


Рис. 6.4. Особенности схемы сдвига надугольной толщи Западного Донбасса (линия 2) по отношению к традиционным представлениям (линия 1)

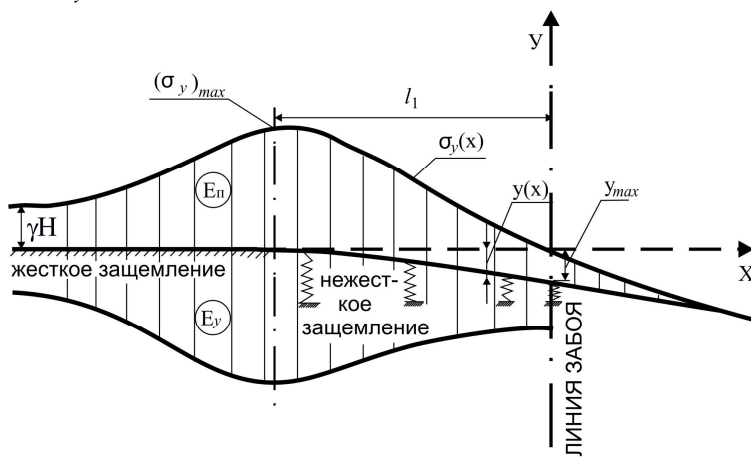
Здесь классические представления об изгибе консольной балки [94] можно условно разделить на два участка. *Первый* – так называемое нежесткое защемление, когда опорная часть в защемлении обладает определенной податливостью (сродни «винклеровскому основанию» в упругой постановке), а верхняя часть (благодаря определенному расслоению кровли) лишь частично

ограничивает поворот поперечного сечения слоя при его изгибе. Степень жесткости защемления (ограниченность поворота поперечного сечения при изгибе слоя) постепенно увеличивается при движении в глубь пласта, так как растет его жесткость (объемный модуль деформации) и снижается разупрочнение, одновременно уменьшается величина расслоения пород кровли. В результате нежесткое защемление произвольного породного слоя постепенно преобразуется в жесткое; началом этого (второго) участка можно считать максимум  $(\sigma_y)_{max}$  опорного давления (см. рис. 6.5), а окончанием – область, где вертикальные напряжения  $\sigma_y(x)$  стабилизируются на уровне исходного состояния  $\gamma H$ .

*Второй*, диаметрально противоположный вариант формирования зоны опорного давления (см. рис. 6.5, б) характеризуется жесткостью угольного пласта, существенно превышающей жесткость породных слоев кровли. Здесь в краевой части пласта концентрируется повышенная нагрузка  $\sigma_y(x)$ , поскольку зависающие породные консоли ложатся друг на друга из-за их повышенной деформируемости, а вертикальные перемещения  $y(x)$  пласта невелики по причине его повышенной жесткости. Расслоения в кровле над очистным забоем частично компенсируются интенсивным опусканием вышележащих слоев – вертикальная нагрузка в породных консолях призабойного пространства возрастает и передается на краевую часть угольного пласта, который при своей небольшой податливости не может распределить концентрацию  $\sigma_y$  на широком участке  $l_1$  путем передачи опорного давления в глубь пласта. Длина  $l_1$  участка нежесткого защемления невелика и на нем распределяется основная часть опорного давления, что обуславливает высокие значения максимумов  $(\sigma_y)_{max}$ .

Указанные закономерности не противоречат сложившимся представлениям о процессах сдвижения надугольной толщи и углевмещающий массив Западного Донбасса преимущественно характеризуется расположением повышенных максимумов опорного давления вблизи груди забоя с увеличенной нагрузкой на механизированную крепь очистных комплексов, как это показано на рис. 6.4 (пунктирная линия). Общеизвестно, что в вышележащих слоях кровли зона опорного давления видоизменяется: максимумы  $(\sigma_y)_{max}$  снижаются; повышенные  $\sigma_y$  распространяются на большее расстояние  $X$  в сторону нетронутого массива впереди лавы. Линия, соединяющая максимумы  $(\sigma_y)_{max}$  по мощности надугольной толщи, наклонена в сторону массива на  $70...75^\circ$  (по отношению к плоскостям напластования), что установлено на основе многочисленных лабораторных исследований на моделях из эквивалентных материалов и результатов компьютерного моделирования сдвижения надугольной толщи.

а)  $E_y < E_{\Pi}$



б)  $E_y > E_{\Pi}$

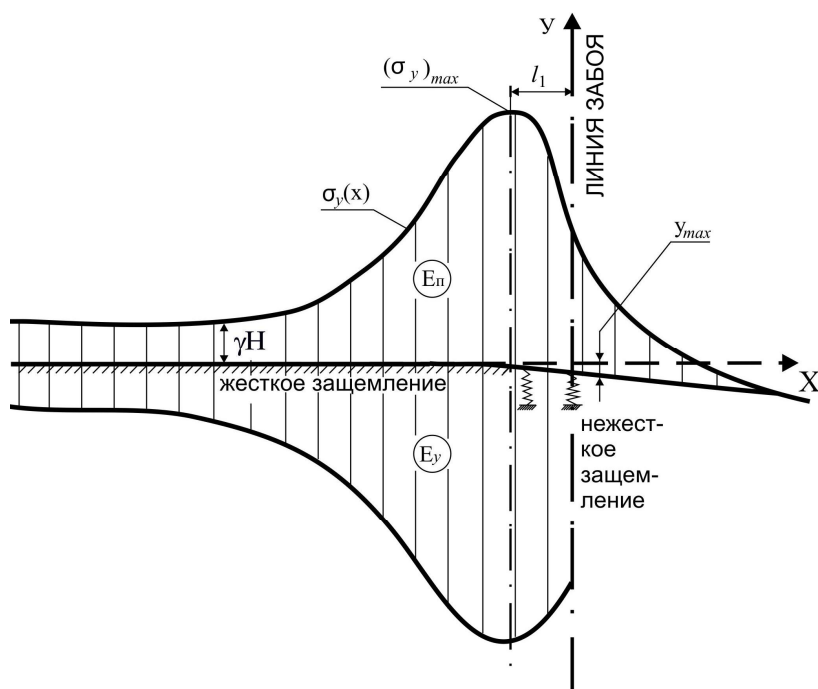
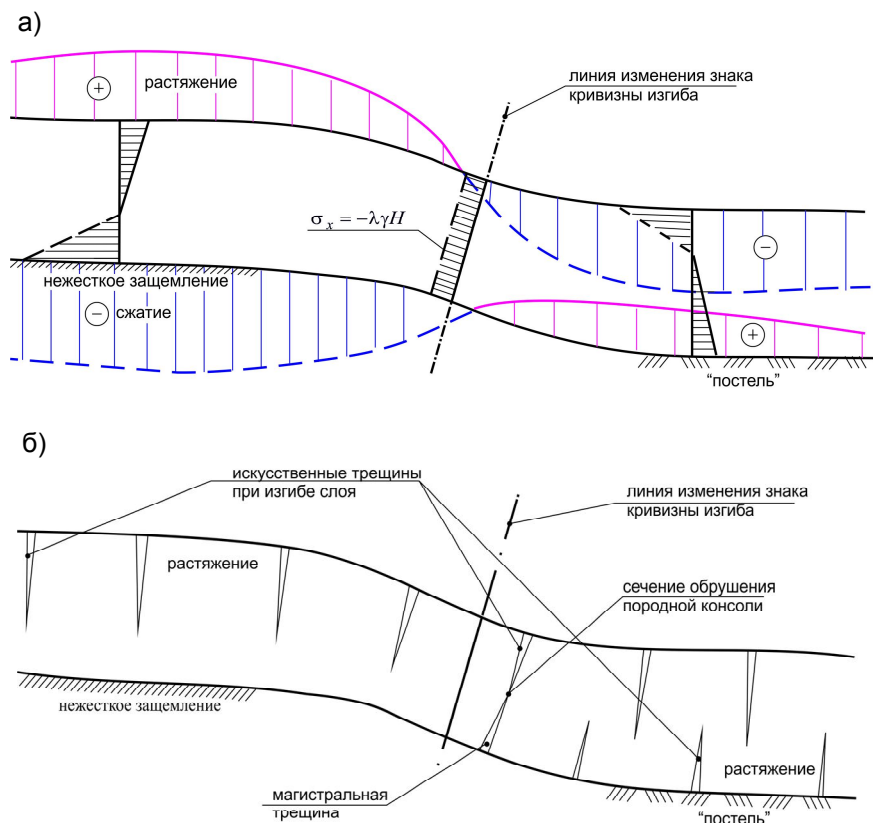


Рис. 6.5. К механизму формирования зоны опорного давления при соотношениях жесткости угольного пласта и пород кровли:  
а)  $E_y < E_{\Pi}$  ; б)  $E_y > E_{\Pi}$



**Рис. 6.6. Схемы изгиба произвольного породного слоя кровли:**  
 а) эпюры горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ ; б) механизм  
 образования и соединения трещин в магистральную  
 при изгибе

В результате моделирования выявлено интенсивное действие изгибающего момента (на каждый породный слой) еще в зоне опорного давления впереди лавы, которое проявляется в том, что в верхней части сечения произвольного слоя развиваются растягивающие горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ , а в нижней части образуется концентрация сжимающих  $\sigma_x$ , которая многократно превышает исходное негидростатическое состояние массива с усилиями бокового распора  $\lambda\gamma H$ . Для более детального и наглядного рассмотрения механизма изгиба выделен произвольный породный слой кровли и проанализированы эпюры горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  (ранее уста-

новленные на стадии предварительного компьютерного моделирования), а также результат их действия, которые проиллюстрированы на рис. 6.6.

Впереди лавы в зоне опорного давления изгиб породного слоя развивается глубже, чем координата  $l_1$  действия максимума  $(\sigma_y)_{max}$  вертикальных напряжений, о чем свидетельствуют аномалии  $(\sigma_x \neq \lambda \gamma H)$  эпюры горизонтальных напряжений. Координата  $X$  начала интенсивного изгиба слоев кровли зависит (при прочих равных условиях) от соотношения жесткости угольного пласта и слоев кровли:

– при  $E_y < E_{II}$  (см. рис. 6.5) отодвигается в глубь массива не только максимум  $(\sigma_y)_{max}$  опорного давления, но и координата  $X$  активного изгиба слоев кровли, что вполне естественно, так как эти процессы тесно связаны между собой;

– при  $E_y > E_{II}$  (наиболее характерно для Западного Донбасса) координата начала активного изгиба слоя кровли приближается к очистному забою, но, все равно, отстоит дальше от него, чем максимум опорного давления.

В любом случае интенсивный изгиб слоя кровли начинается еще на так называемом участке жесткого защемления, где хоть и небольшие деформации сжатия угольного пласта обуславливают изгиб легкодеформирующихся пород кровли в условиях Западного Донбасса. Здесь следует отметить относительно небольшой градиент изменения величины изгибающего момента как над угольным пластом (изгиб происходит в сторону почвы), так и в выработанном пространстве (слой изгибается в сторону кровли) и лишь на небольшом участке пролета слоя, где меняется знак кривизны его изгиба, происходит интенсивное изменение величины изгибающего момента и его знака.

Такое достаточно стабильное поле растягивающих и сжимающих  $\sigma_x$  в пределах пролета слоя кровли (от зоны опорного давления до опирания на обрушенные породы в выработанном пространстве) позволяет предполагать следующие особенности механизма изгиба слоев основной кровли в зоне ведения очистных работ применительно к условиям Западного Донбасса.

Слабые углевмещающие породы Западного Донбасса характеризуются низкими прочностными характеристиками, особенно, при растяжении: сопротивление  $\sigma_p$  растяжению изменяется в основном от 1...1,5 МПа у аргиллитов до 3...3,5 МПа у песчаников. Предварительные расчеты НДС надугольной толщи показывают, что растягивающие горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  в породных слоях кровли при их изгибе могут достигать 10...15 МПа (иногда более), что предопределяет появление и развитие вертикально направленных трещин разрыва в каждом породном слое кровли. Эти трещины распространяются на большую часть мощности породного слоя по причине силовой анизотропии деформационных свойств горных пород. В работе [91] обосновано, что нейтральная ось при изгибе породного слоя смещается в область сжатия, так как модуль деформации горных пород при растяжении



до 8...10 раз меньше, чем при сжатии; поэтому (как показано на рис. 6.6, а), область растягивающих  $\sigma_x$  при изгибе распространяется до 70...75% мощности слоя. С другой стороны, ослабляющие факторы реологии и обводненности резко снижают сопротивление породы растяжению и с некоторым запасом устойчивости при изгибе можно допустить отсутствие сопротивления растягивающим усилиям. Ранее упоминалось об относительно небольшом градиенте изменения растягивающих  $\sigma_x$  как впереди лавы, так и над выработанным пространством, – следовательно, можно предположить появление искусственной системы вертикальных трещин разрыва в верхней части мощности слоя (глубиной до 70...75%) еще в зоне опорного давления впереди лавы (см. рис. 6.6, б). Если к искусственной (техногенной) системе трещин добавить естественную трещиноватость кровли, то образуется породная плита с весьма пониженным сопротивлением изгибу (момент инерции поперечного сечения снижается многократно из-за глубокого распространения трещин) и по этой причине она легко деформируется, ложась на «постель» из нижерасположенных пород, с формированием ограниченных (по координате  $X$ ) полостей отсутствия контакта смежных породных слоев. На участке от линии перегиба слоев (изменение знака кривизны изгиба) до контакта с «постелью» и далее растягивающие  $\sigma_x$  образуются в нижней части породного слоя и провоцируют появление трещин разрыва. В случае смыкания этих трещин (нижних) с ранее образованными верхними трещинами породная плита разбивается на блоки, которые могут сохранять некоторую устойчивость (благодаря усилиям горизонтального распора), но еще более усиливают податливость плиты при изгибе.

Таким образом, изложенный механизм изгиба породного слоя в районе очистного забоя обосновывает наблюдаемые на практике такие явления как: малый шаг посадки основной кровли с неявно выраженными эффектами, сопровождающими этот процесс; плавный изгиб слоев позади лавы с весьма ограниченной длиной зависающих породных консолей. В этом плане линия, характеризующая изменение знака кривизны изгиба слоев по мощности основной кровли, имеет тенденцию (см. рис. 6.4) увеличения угла наклона (по отношению к плоскости напластования) с увеличением высоты расположения породного слоя; эта тенденция замечена рядом исследователей и подтверждена нами при предварительном моделировании опускания надугольной толщи. Также ранее отмечено, что растягивающие  $\sigma_x$  в нижней части мощности слоя появляются рядом с координатой  $X$  изменения знака кривизны изгиба и еще, не достигнув «постели», в нижней части породного слоя образуются трещины разрыва (см. рис. 6.6). Эти трещины периодически смыкаются с трещинами в верхней части мощности слоя (образовавшиеся еще над угольным пластом) и при потере устойчивости распорной системы происходит скопление «завальной» части породной плиты относительно ее призабойной части, то есть, происходит обрушение породного слоя, а при совпадении с трещинами вышележащих слоев развивается про-

цесс одновременного обрушения группы слоев, который обычно квалифицируют как посадку основной кровли.

В целом, механизм обрушения основной кровли представляется как смыкание некоторых трещин в верхней и нижней частях каждого породного слоя и образование магистральной трещины по всей мощности основной кровли, горизонтальная координата  $X$  которой располагается вблизи координаты изменения знака кривизны изгиба слоя. А, так как, при жестком угольном пласте и легкодеформируемых породах кровли (условия Западного Донбасса) изменение знака кривизны изгиба происходит недалеко от ограждения механизированной крепи, то длины породных консолей невелики, а их рост по высоте основной кровли замедляется в связи с приближением к вертикали линии перегиба удаленных породных слоев. Логично предположить, что линия изменения знака кривизны изгиба породных слоев по мощности основной кровли будет ограничивать (со стороны выработанного пространства) объем пород, создающих своим весом нагрузку на механизированную крепь; эта нагрузка периодически изменяется от минимального значения (после посадки основной кровли) до максимальной величины (перед посадкой основной кровли), что обусловлено количеством породных слоев, вовлекаемых в формирование нагрузки на крепь.

Со стороны очистного забоя граница контура пород, опускающихся и нагружающих механизированную крепь, (см. рис. 6.4) зависит от геомеханических и технологических параметров ведения очистных работ.

## 7. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ОЧИСТНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ СДВИЖЕНИИ СЛОИСТОЙ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ СЛАБЫХ ПОРОД

Исследованием состояния углевмещающего массива при ведении очистных работ ставится во главу угла задача изучения механизма нагружения механизированной крепи в зависимости от геомеханических и технологических параметров очистной выемки. В этой связи проанализированы сложившиеся представления и особенность ведения очистных работ в Западном Донбассе с целью обоснования адекватной реальным условиям модели поведения надугольной толщи при ее взаимодействии с механизированной крепью. Ранее была обоснована граница объема пород (со стороны выработанного пространства), которые своим весом формируют нагрузку на механизированную крепь. Эта граница, расположенная рядом с линией изменения знака кривизны слоев кровли (см. рис. 6.4), в большей степени зависит от структуры и свойств надугольной толщи и в меньшей степени – от технологических параметров очистной выемки (в первую очередь, среднесуточной скорости  $V$  подвигания очистного забоя, скорости  $V_k$  подачи и ширины захвата  $B$  исполнительного органа углевыемочной машины: комбайна или струга). Это утверждение базируется на существующих представлениях о зависимости породных консолей (позади механизированной крепи) в надугольной толще пород средней крепости. Согласно им наибольшее влияние (в сотни процентов) на длину породной консоли имеет мощность слоя; в десятки процентов оценивается влияние модуля деформации породного слоя; такую же степень воздействия оказывает среднесуточная скорость подвигания очистного забоя, а скорость подачи углевыемочной машины непосредственно связана с  $V$  через ее технические характеристики, длину лавы и график организации очистных работ в целом. При этом сформировано мнение, что с увеличением длины зависающих породных консолей возрастает нагрузка на механизированную крепь вплоть до момента посадки основной кровли; после этого нагрузка резко снижается (так как «обрезаются» породные консоли) и процесс увеличения нагрузки повторяется по мере движения лавы.

Анализ существующих методов прогноза нагрузки на механизированную крепь привел к выводу, что в основном они исходят из двух базовых положений, имеющих временной характер, то есть, развивающихся не только в пространстве, но и во времени:

- рост длины породных консолей в пределах подвигания лавы на величину шага посадки основной кровли;
- процесс опускания вышележащих слоев на деформирующиеся нижележащие слои кровли, что также обуславливает рост нагрузки на крепь.

Каждая из выделенных двух сторон единого процесса сдвижения на-

дугольной толщи может иметь главенствующее влияние в зависимости от горно-геологических условий ведения очистных работ. Так, ранее было отмечено, что одной из особенностей опускания кровли в Западном Донбассе является малая длина зависающих консолей по причине низких прочностных и деформационных характеристик породных слоев. Следовательно, фактор роста длины породных консолей в пределах шага посадки основной кровли (этот процесс слабо выражен) играет второстепенное (подчиненное) значение при формировании нагрузки на механизированную крепь в отличие от других регионов Донбасса. Тогда основным фактором нагружения механизированной крепи является развитие процесса опускания породных слоев над рабочим пространством лавы и величина нагрузки будет зависеть от объема слоев кровли, контактирующих с крепью через взаимную передачу друг другу части горного давления. Здесь обычно выделяют следующие параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на процесс формирования нагрузки на механизированную крепь:

- структура пород кровли, мощность  $m_i$  отдельных слоев и силы сцепления  $c_i$  их контактов со смежными слоями;
- прочностные (сопротивление сжатию  $\sigma_{сж}^i$  и растяжению  $\sigma_p^i$ ), деформационные (модуль деформации  $E_i$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ ) и реологические (наиболее широко используется реологический показатель  $\left(\frac{\chi}{\beta}\right)_i$ , достаточно подробно изученный в Западном Донбассе) характеристики каждого слоя по мощности основной кровли;
- шаг посадки основной кровли, являющийся функцией первых двух групп параметров, а также других геомеханических факторов (глубина разработки, влияние смежных выемочных участков, наработанных пластов, их обводненности и тому подобное);
- скорость подвигания  $V$  очистного забоя и продолжительности  $t$  его остановки;
- ширина захвата  $B$  исполнительного органа углевыемочной машины и скорость  $V_k$  ее подачи;
- реакция  $P(Z)$  секций механизированной крепи по длине  $Z$  лавы при распоре гидростоек и их максимальном сопротивлении (несущей способности).

## 7.1. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

Механизм влияния первой группы параметров, главными из которых является структура пород кровли и мощность  $m_i$  отдельных слоев, представляется следующим образом. Для его раскрытия и более четкого понимания

на рис. 7.1 изображена схема нагружения отдельного слоя кровли, которая также использована для объяснения механизма влияния других факторов. На схеме деформирования отдельного  $i$ -го слоя кровли мощностью  $m_i$  действующая на него нагрузка разделена на три составляющие: вес  $q_i$  самого слоя; нагрузка  $q_{i+1}(x)$  от соседнего вышележащего слоя; нагрузка  $q_{i-1}(x)$  в виде реакции от соседнего нижележащего породного слоя. Точки 1 и 2 характеризуют границу исчезновения контакта между смежными слоями кровли за счет их расслоения; величина раскрытия полостей  $y_i(x)$  и их длина по плоскостям напластований смежных слоев снижается по мере удаления от лавы – поэтому точка 1 смещается вправо (в сторону выработанного пространства) относительно точки 2.

Как известно [94], деформирование любой балки или плиты (в том числе и породной), у которой высота сечения ( $m_i$ ) многократно меньше длины пролета, определяется в основном изгибающим моментом  $M_i(x)$ , обуславливающим напряжения, на один-два порядка превосходящие таковые от действия нормальных и перерезывающих усилий. Поэтому под схемой нагружения породного слоя приведена качественная эпюра изгибающего момента (см. рис. 7.1, б) как основной характеристики состояния и устойчивости  $i$ -го слоя.

На участке расслоения и потери контакта со смежными слоями (до точки 1) изгиб  $i$ -го слоя определяется только его собственным весом  $q_i$ , а изгибающий момент  $M_i(x)$  возрастает по классической параболической зависимости. На участке между точками 1 и 2 действует пригруз  $q_{i+1}(x)$  со стороны вышележащего породного слоя, который увеличивает градиент роста изгибающего момента по мере приближения к нежесткому защемлению  $i$ -го слоя. Левее точки 2 на  $i$ -тый слой начинает действовать реакция  $q_{i-1}(x)$  нижележащих пород, которая превышает нагрузку  $q_{i+1}(x)$  по условию равновесия. Тогда рост  $M_i(x)$  замедляется и в точке 3 достигает максимума  $M_{max}$ , а по мере заглубления в массив усилия  $q_{i+1}(x)$ ,  $q_i$  и  $q_{i-1}(x)$  компенсируют друг друга и изгибающий момент асимптотически стремится к нулю. Максимум  $M_{max}$  изгибающего момента (точка 3) характеризует наиболее вероятное сечение разлома  $i$ -го слоя, при котором его правая часть полностью ложится на нижерасположенные породы и в конечном счете на механизированную крепь. В этой связи положение точки 3 (по координате  $X$ ) будет определять объем пород  $i$ -го слоя, создающих нагрузку на крепь, задача состоит в раскрытии механизма влияния ранее сгруппированных параметров на координату  $X$  точки 3.

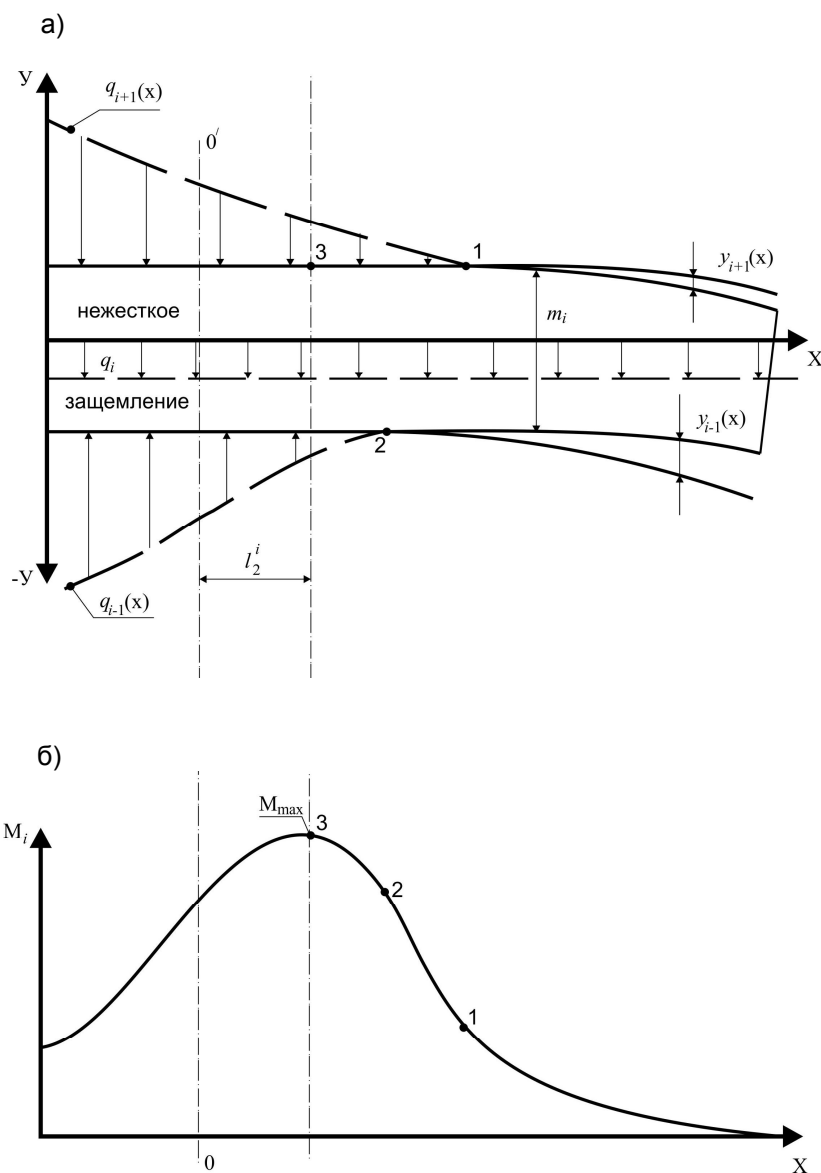


Рис. 7.1. Схема нагружения (а) отдельного слоя кровли над очистным забоем и соответствующая эпюра (б) изгибающего момента

*Первая группа параметров* – структура пород кровли и мощность  $m_i$  отдельных слоев, а силами сцепления  $C_i$  по плоскостям напластований для углевмещающей толщи, например, Западного Донбасса можно пренебречь по причине их малой величины, либо полного отсутствия.

Влияние мощности  $i$ -го слоя состоит в том, что его прогиб  $y_i(x)$  обратно пропорционален моменту инерции, а максимум горизонтальных напряжений  $(\sigma_x)_{max}$  (определяющий обрушение породной консоли при изгибе) обратно пропорционален моменту сопротивления поперечного сечения породного слоя [94]. Раскрывая этот тезис сначала обратимся к связи прогибов породного слоя с его мощностью  $m_i$ . Момент инерции  $I_i$  прямо пропорционален мощности породного слоя в третьей степени  $m_i^3$ , следовательно, при увеличении его мощности прогиб  $y_i(x)$  уменьшается по гиперболической зависимости и это означает (при прочих равных условиях) уменьшение высоты  $y_{i+1}(x)$  полости на контакте с вышележащими породами кровли и увеличение высоты  $y_{i-1}$  полости на контакте с нижележащими породами кровли. При этом: точка 1 потери контакта с вышележащими породами (см. рис 7.1, а) перемещается вправо – происходит рост нагрузки  $q_{i+1}(x)$ ; точка 2 потери контакта с нижележащими породами перемещается влево – реакция  $q_{i-1}(x)$  снижается в районе рассматриваемого участка по координате  $X$  консоли  $i$ -го слоя. Увеличение нагрузки сверху и снижение реакции снизу в районе нежесткого защемления  $i$ -той породной консоли приводит к увеличению изгибающего момента  $M_i$  на участке  $1^I - 2^{II}$  (рис. 7.2, а, пунктирная линия) и его максимума  $M_{max}^I$  в точке  $3^I$ . Одновременно с ростом изгибающего момента  $M_i$  при увеличении мощности  $i$ -го слоя увеличивается и момент сопротивления  $W_i$  поперечного сечения слоя, что способствует повышению его устойчивости, то есть, действуют две взаимно противоположные тенденции в оценке координаты  $(l_2^i)^Y$  наиболее вероятного обрушения породной консоли и ее опускания на нижележащие слои с соответствующим нагружением механизированной крепи. Проанализируем указанные тенденции. Относительно первой – зависимость  $M_i(m_i)$  – можно утверждать следующие:

– во первых, рост нагрузки  $q_{i+1}(x)$  сверху и снижение реакции  $q_{i-1}(x)$  снизу обратно пропорциональны высотам  $y_{i\pm 1}(x)$  соответствующих полостей при прогибе  $i$ -го слоя, которые обратно пропорциональны его мощности в третьей степени (момент инерции сечения  $I_i$  прямо пропорционален  $m_i^3$ ); следовательно, по гиперболической зависимости ( $m_i^3$ ) происходит рост на-

грузки  $q_{i+1}(x)$  и снижение реакции  $q_{i-1}(x)$ ;

– во-вторых, изгибающий момент  $M_i(x)$  в породном слое прямо пропорционален действующим на него нагрузкам  $q_{i+1}(x)$ ,  $q_i$  и  $q_{i-1}(x)$ ; при этом следует учитывать увеличение плеча приложения равнодействующей нагрузки  $q_{i+1}(x)$  и снижение длины плеча равнодействующей реакции  $q_{i-1}(x)$ , по отношению к которым изгибающий момент имеет [28] параболическую (квадратичную) связь;

– в третьих, накладывая две степенные закономерности (кубическую от прогибов и квадратичную от длин плеча равнодействующих) приходим к выводу о чрезвычайно интенсивном росте изгибающего момента  $M_i(x)$  при увеличении мощности  $m_i$   $i$ -го слоя, что изображено на рис. 7.2, а пунктирной линией.

*Вторая закономерность*  $W_i(m_i)$  характеризуется ростом момента сопротивления  $W_i$  сечения лишь по параболической зависимости от мощности  $m_i$   $i$ -го слоя [94]. Если сравнить две функции  $M_i(m_i)$  и  $W_i(m_i)$ , то первая будет увеличиваться более интенсивно по отношению ко второй, следовательно, их отношение  $\frac{M_i}{W_i}(m_i)$  будет возрастать. С другой стороны, отношение  $\frac{M_i}{W_i}$

характеризует напряжения  $\sigma_x$  изгиба породного слоя, максимальное значение которых в области сжатия ограничено соответствующим пределом прочности породы  $\sigma_{сж}$ . Поэтому существует максимальное значение изгибающего момента  $M'_{об}$ , при котором достигается предел прочности породы на сжатие и наступает условие обрушения породной консоли и ее опускания на нижележащие слои. Поскольку при повышенной мощности  $m_i$   $i$ -го слоя изгибающий момент растет весьма интенсивно, то предельное состояние консоли (см.рис. 7.2, а, точка 4<sup>l</sup>) наступает задолго до достижения изгибающим моментом максимального значения  $M_{max}$  в точке 3<sup>l</sup> и расстояние  $(l_2^i)^Y$  от нежесткого защемления увеличивается, то есть, возрастает длина зависания консоли.

Увеличение расстояния  $(l_2^i)^Y$  с ростом мощности  $i$ -го слоя приводит (согласно схеме на рис. 6.4) к снижению объема пород, создающих нагрузку на механизированную крепь. С другой стороны, с увеличением  $m_i$  возрастает вес  $i$ -го слоя, который после опускания на нижележащие слои активно участвует в формировании нагрузки на крепь. Эти две тенденции обуславливают неоднозначную связь нагрузки  $Q_i(m_i)$  с мощностью  $m_i$   $i$ -го слоя, которая качественно изображена сплошной линией на рис. 7.2, б. При малой мощности  $i$ -го слоя нагрузка от собственного веса невелика и при  $m_i = 0$  суммар-



ная нагрузка от веса  $i$ -го количества слоев кровли  $Q_i$  соответствует весу  $Q_{i-1}$ , создаваемого нижележащими слоями.

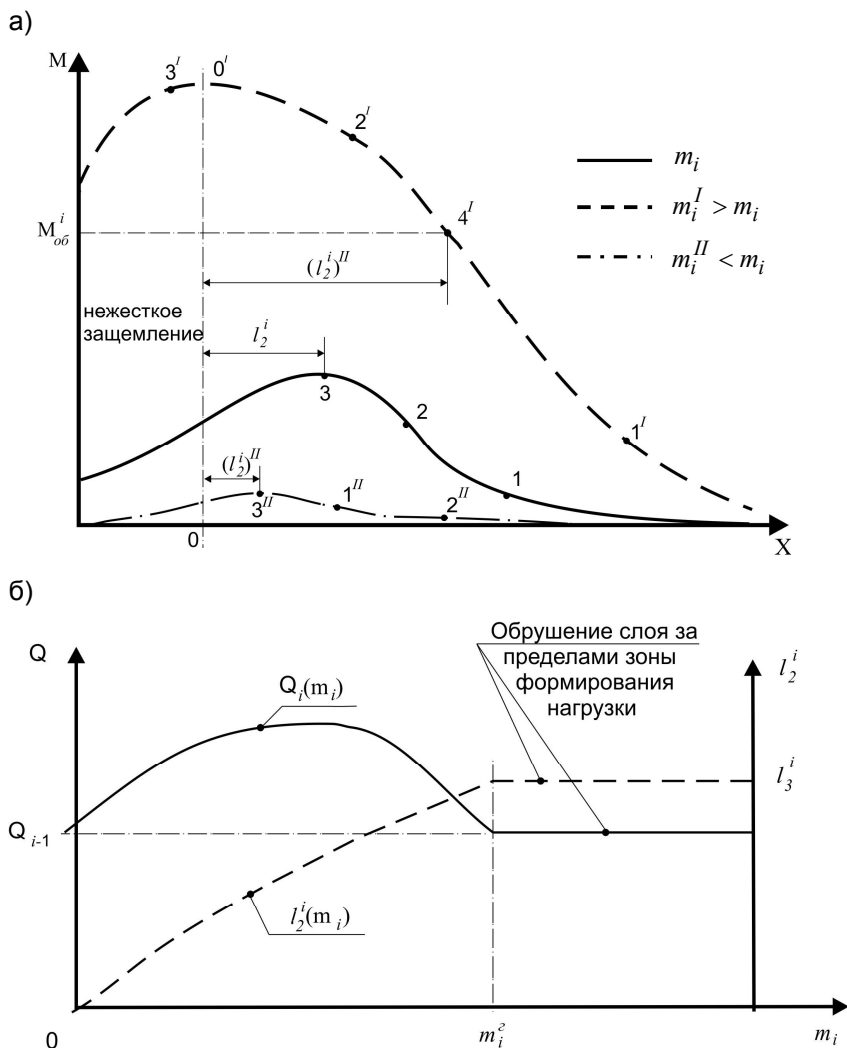


Рис. 7.2. Качественные закономерности влияния мощности  $m_i$  на эпюру (а) изгибающего момента  $M_i$  в  $i$ -том слое кровли и параметры (б) нагрузки  $Q_i$  (—) и длины  $l_2^i$  (- - -) породной консоли

Поскольку слой малой мощности  $m_i$  характеризуется низкой жесткостью, то его повышенный прогиб обеспечивает перемещение точки 2 вправо с одновременным увеличением реакции  $q_{i-1}(x)$  и плеча ее приложения относительно нежесткого защемления (см. рис. 7.1, а). Малая мощность слоя  $m_i$  и повышенная реакция  $q_{i-1}(x)$  обеспечивают низкий градиент роста изгибающего момента – так, что его максимум в точке  $3^{II}$  (см. рис. 7.2, а) располагается вблизи координаты нежесткого защемления и длина породной консоли  $(l_2^i)^{II}$  будет невелика. Следовательно, в начале роста  $m_i$  нагрузка  $Q_i$  будет увеличиваться по закону, близкому к линейному, так как линейно увеличивается вес  $i$ -го слоя от параметра  $m_i$  (см. рис. 7.2, б). Дальнейший рост  $m_i$  способствует увеличению длины  $l_2^i$  зависающей консоли и градиент роста нагрузки  $Q_i$  замедляется. Причем, в зависимости от высоты расположения  $i$ -го слоя от секции крепи, замедление роста функции  $Q_i(m_i)$  может переходить в ее убывание, когда рост породных консолей  $l_2^i(m_i)$ , показанный пунктирной линией, будет уменьшать объем пород  $i$ -го слоя больше, чем увеличение этого объема, связанного с ростом  $m_i$ . Увеличение роста  $m_i$  до некоторой граничной величины  $m_i^c$  приводит к тому, что зависающая консоль  $l_2^i$  достигает границы  $l_3^i$  формирования нагрузки на крепь со стороны выработанного пространства (см. рис. 6.4), она опускается уже на обрушенные породы в выработанном пространстве и не участвует в нагружении крепи, поэтому, при  $m_i \geq m_i^c$  (см. рис. 7.2, б) крепь воспринимает только вес  $Q_i$  нижележащих пород.

Таким образом, рассмотрен механизм влияния на нагружение крепи мощности  $m_i$  отдельного слоя; их взаимодействие друг с другом представляет собой сложный процесс, при описании которого не обойтись без компьютерного моделирования сдвижения надугольной толщи. В качественном плане можно предположить следующий механизм влияния структуры надугольной толщи на состояние отдельного слоя кровли.

Рассмотрим вариант тонкослоистой структуры пород кровли, залегающих выше рассматриваемого породного слоя, при неизменной структуре ниже-расположенных слоев. Верхние маломощные слои  $m_{i+\kappa}$  (где  $\kappa = 1, 2, 3 \dots n$ ) обладающие низким моментом инерции  $I_{i+\kappa}$  и моментом сопротивления  $W_{i+\kappa}$  поперечного сечения, испытывая значительны прогибы и нарушения сплошности, опускаются на рассматриваемый породный слой мощностью  $m_i$ . Нагрузка  $q_{i+\kappa}(x)$ , в том числе и по контакту  $i+1$ , увеличивается одно-

временно с перемещением точки  $1^I$  потери контакта вправо (см. рис. 7.1, а). При этом породная консоль  $m_i$  испытывает высокий изгибающий момент  $M_i$  (см. рис. 7.2, а), многократно превышающий ее несущую способность, что обусловлено двумя факторами:

- с одной стороны, совместное действие повышенной нагрузки (линейная связь с изгибающим моментом  $M_i$ ) и увеличение плеча ее равнодействующей (квадратичная связь с учетом распределения нагрузки по длине консоли);
- с другой стороны, момент сопротивления  $W_i$  поперечного сечения рассматриваемого слоя остается постоянным.

В совокупности имеет место степенная функция (с показателем степени больше двух) роста  $M_i$  при неизменном  $W_i$ , что отодвигает точку  $4^I$  обрушения консоли вправо (см. рис. 7.1, а) и способствует росту нагрузки, передающейся на крепь. Однако, процесс обрушения и опускания слоя  $m_i$  не заканчивается (рис. 7.3, а): разлом слоя в точке  $4^I$  резко снижает изгибающий момент (сплошная линия), так как исчезает часть нагрузки  $q_{i+1}(x)$ , расположенная правее абсциссы точки  $4^I$  и уменьшается длина пролета равнодействующей оставшейся нагрузки на породную консоль  $i$ -го слоя, расположенную левее абсциссы точки  $4^I$ . Тем не менее, величина нагрузки  $q_{i+1}(x)$  на участке  $(l_2^i)^Y$  такова, что изгибающий момент  $M_i$  в породной консоли длиной  $(l_2^i)^Y$  превышает максимально возможную величину  $M_{об}^I$  и в точке  $4^{III}$  происходит ее разрушение и опускание на нижележащие породы. В результате образуется устойчивая породная консоль длиной  $(l_2^i)^{III}$  многократно меньше первоначальной длины  $(l_2^i)^Y$  и контур свода формирования нагрузки на крепь (см. рис. 6.4) приближается к границе нежесткого защемления слоя  $m_i$ . Таким образом, тонкослоистая структура верхней (по отношению к слою  $m_i$ ) части кровли увеличивает объем пород, формирующих нагрузку на механизированную крепь.

В другом варианте присутствия тонкослоистой структуры не только выше, но и ниже слоя  $m_i$ , последняя часть кровли, обладая повышенным прогибом, снижает величину реакции  $q_{i-1}(x)$  с перемещением точки 2 влево (см. рис. 7.1, а). При этом изгибающий момент в слое  $m_i$  увеличивается еще больше и по описанному выше механизму его деформирования предполагается следующий процесс (см. рис. 7.3, б). Интенсивно растущий изгибающий момент  $M_i$  по мере приближения к нежесткому защемлению превышает величину

$M_{об}^I$  и в точке  $4^I$  происходит разрушение консоли; на оставшейся ее длине  $(l_2^i)^Y$  изгибающий момент увеличивается от нуля (точка  $1^{III}$  до максимума (точка  $3^{III}$ ) с превышением в точке  $4^{III}$  предельной величины  $M_{об}^{III} = M_{об}^I$ , – происходит следующее обрушение слоя с образованием укороченной консоли  $(l_2^i)^{III}$ . Но реакция  $q_{i-1}(x)$  нижележащих тонкослоистых пород невелика по причине их повышенного прогиба и изгибающий момент  $M_i$  на этом участке снова интенсивно возрастает, превышая предельное значение  $M_{об}^{III} = M_{об}^I$  в точке  $4^{IV}$ ; здесь образуется небольшая консоль длиной  $(l_2^i)^{IV}$ .

Таким образом, тонкослоистая структура пород кровли при своем повышенном прогибе способствует значительному нагружению  $i$ -го слоя с развитием его поэтапного разрушения и опускания; при этом образуются породные консоли с малой длиной вылета за пределы нежесткого защемления, а контур свода формирования нагрузки на крепь (см. рис. 6.4) приобретает более вертикальное положение, что увеличивает объем неустойчивых пород над очистным забоем и нагрузку на механизированную крепь. В данной ситуации ограничение нагрузки возможно лишь при весьма мощном  $i$ -том слое (см. рис. 7.2, б), который при своей высокой жесткости (при условии его целостности) полностью воспринимает горное давление от вышележащих слоев и передает его на обрушенные породы в выработанном пространстве с, одной стороны, и призабойный массив впереди лавы, с другой стороны. Такой структуры надугольной толщи в пределах мощности основной кровли в Западном Донбассе практически не встречается, поэтому достаточно обоснованно можно прогнозировать увеличение объема неустойчивых пород с перемещением контура формирования нагрузки на крепь в сторону груди забоя в тонкослоистом массиве. При наличии среднеслоистой структуры контур свода формирования нагрузки перемещается в сторону выработанного пространства (см. рис. 6.4) и объем неустойчивых пород над очистным забоем уменьшается. Таковым нам представляется механизм влияния структуры надугольной толщи и мощности  $m_i$  ее отдельного слоя на развитие нагрузки на крепь очистного комплекса.

## 7.2. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОДНЫХ СЛОЕВ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

Следующим этапом исследований является раскрытие механизма влияния деформационных свойств пород надугольной толщи на формирование нагрузки на механизированную крепь очистных комплексов применительно к

особенностям отработки пологих пластов в сложных горно-геологических условиях, например, Западного Донбасса.

В существующих методах прогноза развития нагрузки на механизированную крепь, где основным влияющим фактором является длина  $l_3^i$  породной консоли (см. рис. 6.4), главное внимание уделяется модулю деформации  $E_i$  породного слоя. Здесь необходимо уточнение величины  $E_i$  в плане общеизвестной физической неоднородности породы в зависимости от знака прикладываемой нагрузки: например, в работе [92] утверждается, что модуль деформации породы на растяжение  $E_i^P$  в 8...10 раз меньше модуля деформации породы на сжатие  $E_{сж}^P$  и этот факт большинство исследователей связывают с наличием трещиноватости и слоистости углевмещающей толщи пород Донбасса. Учет такой «разномодульности» породы (силовой анизотропии) рекомендуют производить введением так называемого приведенного модуля деформации, который обозначим через  $E_i$ , а его величина, равная

$$E_i = \frac{4E_{сж}^i \cdot E_p^i}{\left( \sqrt{E_{сж}^i} + \sqrt{E_p^i} \right)^2} \quad (7.1)$$

будет, примерно, в четыре раза меньше (при вышеуказанном соотношении  $\frac{E_p^i}{E_{сж}^i}$  на растяжение и сжатие), чем  $E_{сж}^i$ , определяемый в лабораторных условиях.

Прочностные характеристики пород (сопротивление сжатию  $\sigma_{сж}^i$  и растяжению  $\sigma_p^i$ ), как правило, редко учитываются при описании процессов сдвига и обрушения слоев кровли над очистным забоем и в выработанном пространстве. Здесь при несущественном сопротивлении растяжению литологических разностей слабых пород, например, Западного Донбасса целесообразно ограничиться лишь сопротивлением пород сжатию  $\sigma_{сж}^i$ , тем более, что эта характеристика достаточно исследована в рассматриваемом регионе [125-127]. В этих же работах детально изучены реологические свойства пород Западного Донбасса, данные которых будут использованы при изучении механизма развития во времени нагрузки на механизированную крепь в части снижения прочностных и деформационных характеристик породных слоев в процессе ведения очистных работ.

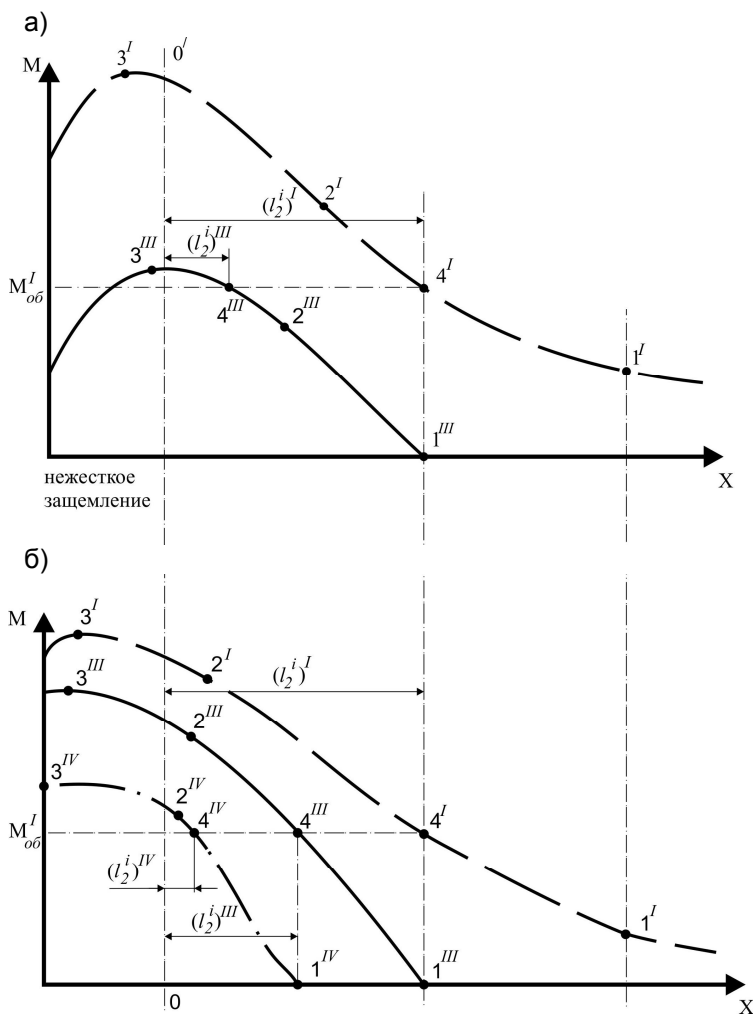


Рис. 7.3. Качественная эпюра изгибающего момента  $M_i$  при вариантах залегания тонкослоистых пород кровли: а) выше  $i$ -го слоя; б) выше и ниже  $i$ -го слоя

Оценим влияние модуля деформации  $i$ -го слоя пород на процесс его изгиба и опускания с использованием схемы на рис. 7.1. Повышенный модуль деформации  $E_i$  увеличивает жесткость  $i$ -го слоя и уменьшает величину его прогиба  $y_i(x)$ ; это обуславливает уменьшение высоты  $y_{i+1}(x)$  полости на верхней поверхности слоя и увеличение высоты  $y_{i-1}(x)$  полости на нижней его поверхности при прочих равных условиях. Как следствие, точка 1 пере-

мещается вправо с увеличением нагрузки  $q_{i+1}(x)$  на породную консоль, а точка 2 перемещается влево, способствуя снижению реакции  $q_{i-1}(x)$ . В результате изгибающий момент  $M_i$  возрастает (аналогично изменению  $M_i$ , качественно представленному линиями на рис. 7.3, б), а его предельное значение  $M_{об}^I$  остается постоянным по причине неизменных других условий. Тогда происходит процесс, уже описанный ранее: разрушение и опускание консоли длиной  $(l_2^i)^Y$ , возрастание  $M_i$  на ее длине до предельного значения  $M_{об}^I$  с последующим обрушением и поэтапное уменьшение длины консоли сначала до  $(l_2^i)^{III}$ , а затем до  $(l_2^i)^V$ . Таким образом, при увеличении  $E_i$  повышенная жесткость слоя генерирует увеличение его нагруженности (классический механизм деформирования неоднородных систем), что обуславливает уменьшение длины консоли. Такая закономерность  $l_2^i(E_i)$  находится в противоречии с зависимостью, предложенной в работе [91] для ориентировочного определения длины консоли. Однако, это противоречие «кажущееся», так как в работе [91] имеется ввиду длина консоли, обрушающаяся на крепь, то есть разница  $l_3^i - l_2^i$  по схеме на рис. 6.4 и, если по нашим представлениям длина консоли  $l_2^i$  снижается с увеличением  $E_i$ , то вышеуказанная разница будет увеличиваться, устраняя противоречие. Кроме того, сформулированный нами вывод находится в полном согласии с энергетическими представлениями в геомеханических системах: увеличивающаяся потенциальная энергия состояния  $i$ -го породного слоя (повышенные напряжения и деформации) должна компенсироваться повышенной кинетической энергией в процессе разрушения, которая прямо пропорциональна объему опускающихся пород, – следовательно, обратно пропорциональна длине  $l_2^i$  зависящей консоли.

В противоположном случае пониженного модуля деформации  $E_i$   $i$ -го породного слоя его увеличенный прогиб способствует росту высоты полости  $y_{i+1}(x)$  на верхней поверхности и снижению высоты полости  $y_{i-1}(x)$  на нижней поверхности слоя (см. рис. 7.1, а). Это вызывает (как уже было отмечено ранее) перемещение точки 1 влево с уменьшением нагрузки  $q_{i+1}(x)$ , а точки 2 – вправо с увеличением реакции  $q_{i-1}(x)$ . В результате изгибающий момент  $M_i$  по длине консоли растет менее интенсивно, что обуславливает следующие варианты развития процесса. Первый – максимальный изгибающий момент  $M_{max}$  в точке 3<sup>III</sup> (см. рис. 7.3, б) больше предельной величины  $M_{об}^I$  и разрушение консоли происходит в точке 4<sup>III</sup> с образованием ее вы-

лета длиной  $(l_2^i)^{III}$ ; дальнейший рост изгибающего момента  $M_i$  от точки  $1^{IV}$  отличается низкой интенсивностью и его максимум  $M_{max}$  в точке  $3^{IV}$  меньше предельной величины  $M_{об}^I$ , – тогда вновь образованная устойчивая консоль характеризуется повышенной длиной  $(l_2^i)^{III}$ . Второй вариант – модуль деформации  $E_i$   $i$ -го породного слоя весьма низок и градиент роста изгибающего момента до такой степени невелик, что консоль будет разрушаться в точке 3 действия максимума изгибающего момента  $M_{max}$  (см. рис.7.1, б), располагающегося на расстоянии  $l_2^i$ , определяемом (в том числе) положениями точек 1 и 2. В нашем случае точка 2 будет более удалена от нежесткого защемления, чем точка 1; следовательно, точка 3 максимума  $M_{max}$  также будет удаляться от нежесткого защемления и длина  $l_2^i$  консоли увеличивается. Таким образом, сделан вывод об увеличении длины консоли  $l_2^i$   $i$ -го породного слоя при снижении его модуля деформации  $E_i$  за счет того, что более податливый слой опирается на нижележащие породы и благодаря их реакции устойчивость  $i$ -го слоя повышается.

Данный вывод (при низком  $E_i$ ) требует осмысления в части того, что, на первый взгляд, легко деформирующийся породный слой должен сразу же обрушаться с образованием консоли небольшой длины  $l_2^i$ , а контур свода формирования нагрузки (см. рис. 6.4) принимать более вертикальное положение. Мы же утверждаем, что при низком  $E_i$  длина консоли  $l_2^i$  увеличивается – но, кажущееся противоречие объясняется тем, что мы на данном этапе рассматриваем деформирование отдельного слоя, а не пород кровли как взаимодействующей системы этих отдельных слоев.

В этом плане, рассматривая надугольную толщу как взаимодействующую систему отдельных слоев, выделены несколько наиболее вероятных случаев влияния модуля деформации  $E_i$  на формирование нагрузки на механизированную крепь через параметр  $l_2^i$ . Сначала разберем «спорный» случай низкого модуля деформации  $E_i$   $i$ -го слоя: он, опускаясь на нижележащие слои, увеличивает на них нагрузку, что может привести к обрушению сформировавшихся ниже породных консолей и уменьшению их длины; это сопровождается снижением реакции  $q_{i-1}(x)$  и плеча ее равнодействующей на  $i$ -тый слой, увеличением в нем изгибающего момента  $M_i$  и последующим обрушением с уменьшением устойчивой длины  $l_2^i$  консоли. Аналогичная цепная реакция может возникнуть по причине потери устойчивости консолей



вышележащих породных слоев – ведь реакция  $q_{i+1}(x)$  на них  $i$ -го слоя снижается из-за его опускания. Обрушающиеся вышележащие породы увеличивают нагрузку  $q_{i+1}(x)$  на  $i$ -тый слой, изгибающий момент  $M_i$  в нем растет и он также обрушается с уменьшением длины  $l_2^i$  консоли; данная цепная реакция может развиваться на нижележащие слои. Поэтому окончательный вывод закономерности влияния модуля деформации слоев можно делать на основе исследования их взаимодействия наиболее современным, учитывающим большое количество факторов и мощным инструментом – компьютерным моделированием геомеханических процессов.

Здесь же сделана попытка раскрыть механизм влияния деформационных свойств пород кровли с тем, чтобы в компьютерной модели наиболее объективно были отражены реально протекающие процессы. В этом плане оценено влияние модулей деформации вышележащих  $E_{i+k}$  и нижележащих  $E_{i-k}$  слоев на состояние  $i$ -го породного слоя. При повышенных деформационных характеристиках вышележащих слоев они за счет более высокой жесткости испытывают пониженный прогиб  $y_{i+k}(x)$  над лавой и примыкающим выработанным пространством. Параметры  $i$ -го слоя остаются неизменными, поэтому высота полости  $y_{i+1}(x)$  увеличивается (за счет ограничения прогиба вышележащих слоев) и точка 1 (см. рис. 7.1, а) смещается влево – нагрузка  $q_{i+1}(x)$  на  $i$ -тый слой снижается. При неизменных параметрах нижележащих слоев точка 2 остается на месте, также как и не меняется величина реакции  $q_{i-1}(x)$  нижележащих слоев. Следовательно, изгибающий момент  $M_i$  снижается по величине, а его максимум в точке 3 удаляется на большее расстояние  $l_2^i$  от нежесткого защемления. В итоге, имеет место тенденция роста длины консоли  $l_2^i$  (она более разгружена) с увеличением модуля деформации  $E_{i+k}$  вышележащих слоев.

В другом варианте распределения деформационных характеристик по мощности пород основной кровли, когда повышенные модули деформации  $E_{i-k}$  имеют нижележащие породные слои, прогнозируется следующий механизм. Здесь снижается прогиб нижележащих слоев и высота  $y_{i-1}(x)$  полости уменьшается, что влечет за собой (при прочих равных условиях) перемещение точки 2 вправо и увеличение реакции  $q_{i-1}(x)$  – изгибающий момент  $M_i$  снижается, а его максимум в точке 3 перемещается вправо. То есть, повышается устойчивость породной консоли, что обуславливает рост ее длины  $l_2^i$ .

В третьем варианте повышенных деформационных характеристик как в вышележащих, так и в нижележащих породных слоях (по отношению к  $E_i$ ) сочетаются оба предыдущие варианты, то есть, снижение нагрузки  $q_{i+1}(x)$  от вышележащих слоев и увеличивающаяся реакция  $q_{i-1}(x)$  со стороны ниже-

лежащих слоев, что в совокупности приводит к значительному повышению устойчивости  $i$ -го слоя и росту длины  $l_2^i$  его консоли.

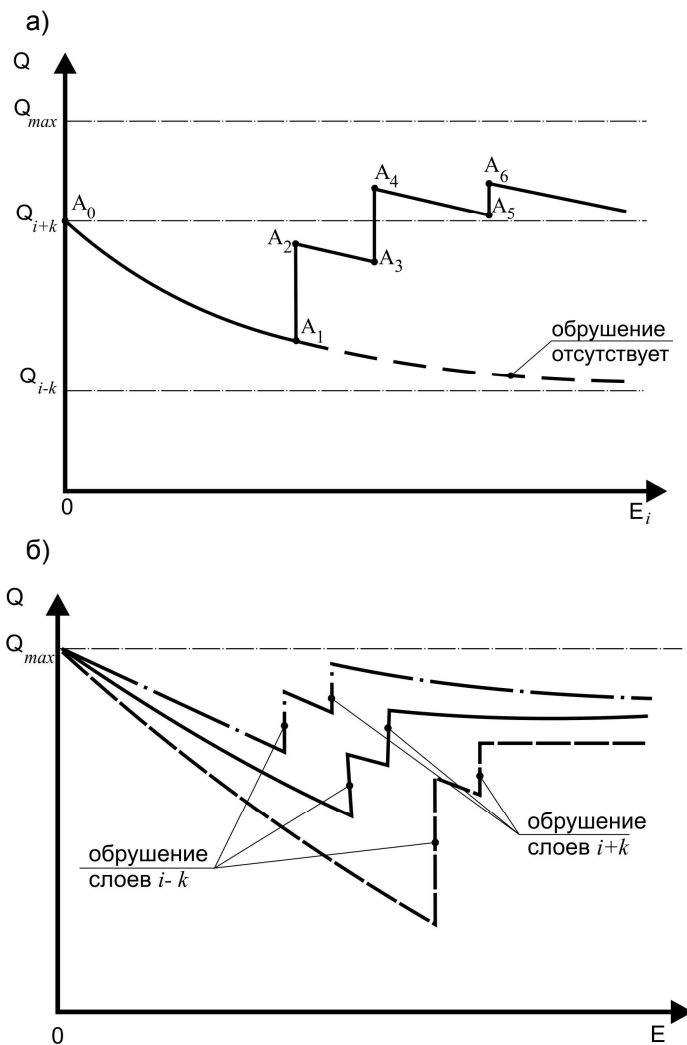


Рис. 7.4. Схематическое представление развития нагрузки  $Q$  на механизированную крепь в зависимости от модуля деформации  $E_i$   $i$ -го слоя (а) и модулей деформации  $E$  кровли в целом (б) при: —  $E_{i+k} = E$  ;  
 - - -  $E_{i-k} < E$  ; - · - ·  $E_{i+k} > E$

Таким образом, превышение модулей деформации  $E_{i\pm k}$  любых слоев кровли над модулем деформации  $E_i$  отдельного слоя во всех вариантах приводит к увеличению длины  $l_2^i$  консоли. В противоположном случае ( $E_i > E_{i\pm k}$ ) повышенная жесткость  $i$ -го слоя генерирует развитие на него повышенной нагрузки  $q_{i+k}(x)$  от вышележащих слоев и пониженной реакции  $q_{i-k}(x)$  со стороны нижележащих слоев. Это способствует снижению устойчивости породной консоли (как уже было рассмотрено выше) и уменьшению ее длины  $l_2^i$ .

Теперь рассмотрим, как изменение деформационных характеристик слоев влияет на формирование нагрузки на механизированную крепь в соответствии со схемой сдвижения надугольной толщи (см. рис. 6.4), где основное внимание уделено положению контура свода над очистным забоем. Для этого разработано схематическое представление процесса, показанное на рис. 7.4.

Сначала рассмотрена связь нагрузки  $Q$  на механизированную крепь с модулем деформации  $E_i$   $i$ -го слоя с учетом ранее приведенных особенностей механизма развития многостадийного нагружения и обрушения слоев кровли (см. рис. 7.4, а). При неизменных модулях деформации  $E_{i\pm k}$  выше и нижележащих породных слоев проследим качественное изменение нагрузки  $Q$  на механизированную крепь, начиная с экстремального значения  $E_i \rightarrow 0$  (точка  $A_0$ ), которому соответствует некоторая нагрузка  $Q_{i+k}$ . По мере увеличения  $E_i$   $i$ -тый слой за счет своей растущей жесткости снижает передачу нагрузки на нижележащие слои, воспринимая на себя все большую часть нагрузки от вышележащих слоев; следовательно, нагрузка  $Q$  на крепь снижается (участок  $A_0 \dots A_1$ ). Такая тенденция не может длиться бесконечно, как это показано пунктирной линией, асимптотически приближающейся к величине нагрузки  $Q_{i-1}$  от нижележащих слоев; при тонко- и среднеслоистой структуре кровли в точке  $A_1$  происходит обрушение  $i$ -го слоя из-за высокой нагрузки со стороны вышележащих слоев и низкой реакции со стороны нижележащих слоев; обрушение некоторой длины консоли  $i$ -го слоя скачкообразно увеличивает нагрузку на крепь (участок  $A_1 \dots A_2$ ). Дальнейшее увеличение  $E_i$  опять снижает нагрузку  $Q$  (участок  $A_2 \dots A_3$ ), но менее интенсивно, так как возникающая, вновь образованная, консоль уже имеет меньшую длину. Тем не менее, при определенном ее значении опять происходит обрушение консоли по вышеуказанным причинам (точка  $A_3$ ) и нагрузка  $Q$  скачкообразно (участок  $A_3 \dots A_4$ ) увеличивается на вес соответствующего объема пород. Здесь нагрузка в точке  $A_4$  может превзойти изначальную величину  $Q_{i+k}$  (точка

$A_0$ ), поскольку все возрастающая жесткость  $i$ -го слоя провоцирует обрушение укороченных консолей  $i$ -го слоя по ранее описанному механизму. В результате при  $E_i \rightarrow \infty$  длина зависающей консоли стремится к нулю и весь объем  $i$ -го слоя, а также повышенная часть вышележащих пород участвует в формировании нагрузки на механизированную крепь, которая приближается к теоретически максимальному значению  $Q_{max}$ .

Теперь перейдем к рассмотрению закономерности влияния модулей деформации  $E$  всех породных слоев основной кровли на формирование нагрузки  $Q$  на механизированную крепь (см. рис. 7.4, б). При однородной кровле (модуль деформации всех слоев одинаков  $E_{i\pm k} = E$ , сплошная линия) повышение деформационных свойств одновременно всех слоев снижает интенсивность их опускания и, соответственно, нагрузку на крепь до момента обрушения нижней части слоев – нагрузка скачкообразно возрастает. При этом со стороны нижележащих слоев отпор исчезает на участке обрушившихся консолей и устойчивость вышележащих слоев снижается; при дальнейшем росте  $E$  происходит обрушение и вышележащих слоев – снова нагрузка резко возрастает и цикл закономерности  $Q(E)$  повторяется. Во втором варианте пониженного модуля деформации нижележащих слоев ( $E_{i-k} < E$ , пунктирная линия) зависимость  $Q(E)$  более интенсивно снижается на первом участке, так как менее жесткие нижележащие слои формируют основную долю нагрузки, передаваемой более жесткими вышележащими слоями. Достигнув некоторой предельной длины (большей, чем при однородных породах за счет своей податливости) консоли нижележащих слоев обрушаются в первую очередь и вес части длины породной консоли передается на крепь – нагрузка  $Q$  скачкообразно возрастает; при этом снижается реакция на вышележащие слои, они переходят в неустойчивое состояние и также часть из них обрушается, провоцируя еще один скачок нагрузки на механизированную крепь. Далее процесс может повторяться, но общая тенденция такова, что нагрузка на механизированную крепь при  $E_{i-k} < E$  все же ниже, чем при однородной кровле, так как часть более жестких вышележащих породных слоев не обрушается, с одной стороны, а, с другой, – благодаря своей жесткости эти слои передают пониженную нагрузку на крепь. В третьем варианте ( $E_{i+k} > E$ , штрих-пунктирная линия на рис. 7.4, б) первый участок зависимости  $Q(E)$  аналогичен предыдущим, но линия располагается выше остальных вариантов, так как более деформируемые вышележащие слои гораздо интенсивнее опускаются на нижележащие, нагружают последние и процесс обрушения породных консолей происходит раньше.

Общий вывод о закономерностях влияния модуля деформации  $E$  на нагрузку  $Q$  на механизированную крепь таков:

– до и после стадий обрушения породных консолей нагрузка  $Q$  уменьша-

ется с увеличением их модулей деформации  $E$  по причине ограничения прогибов более жестких породных слоев;

- в период обрушения нагрузка скачкообразно увеличивается за счет веса объемов пород, опускающихся на крепь;

- процесс обрушения носит характер цепной реакции и начинается, как правило, с нижележащих слоев до такой высоты, когда наступает устойчивое состояние ближайшего вышележащего слоя на длине его пролета от груди забоя до контакта с обрушенными породами в выработанном пространстве;

- в этом процессе залегание в основной кровле более мощной литологической разности с повышенным модулем деформации (например, песчаника) резко увеличивает жесткость слоя и может привести как к замыканию свода обрушения с формированием пониженной нагрузки на крепь, так и к резкому скачку нагрузки при обрушении слоя в пределах рабочего пространства лавы и примыкающему к нему участку выработанного пространства.

### 7.3. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

Следующий этап раскрытия механизма развития нагрузки на механизированную крепь посвящен исследованию влияния сопротивления сжатию  $\sigma_{сж}^i$   $i$ -го породного слоя и основной кровли в целом по всей ее мощности.

Здесь следует отметить схожесть механизма влияния прочностных ( $\sigma_{сж}$ ) и деформационных ( $E$ ) свойств пород на процесс их послойного опускания на крепь и в примыкающее выработанное пространство; тем не менее, имеется и ряд особенностей. Общая тенденция такова, что с увеличением  $\sigma_{сж}^i$  (при прочих равных условиях) линейно растет момент  $M_{y\partial}^i$ , удерживающий породную консоль от обрушения

$$M_{y\partial}^i = \sigma_{сж}^i W_i, \quad (7.2)$$

что обуславливает увеличение ее длины  $l_2^i$ . Но, с ростом  $l_2^i$  линейно возрастает нагрузка  $Q_i$  от собственного веса консоли (см. рис. 7.1, а). При этом, учитывая параболическую связь прогибающего момента  $M_i$  в консоли с ее длиной  $l_2^i$  [94], приходим к выводу, что соотношение «удерживающего» и

изгибающего моментов  $\frac{M_{y\partial}^i}{M_i}$  с увеличением длины консоли будет снижать-

ся, несмотря на увеличение  $\sigma_{сж}^i$ ; поэтому, рост длины консоли ограничивается более резким снижением ее устойчивости. С другой стороны, в отличие от влияния  $E_i$ , жесткость консоли с ростом  $\sigma_{сж}^i$  не изменяется, следовательно нагрузка  $q_{i+1}(x)$  сверху и реакция  $q_{i-1}(x)$  снизу на  $i$ -тую консоль остаются прежними и не происходит существенного перераспределения нагрузки между вышележащими и нижележащими породными слоями в период роста длины консоли до момента ее обрушения. Вполне вероятно этот процесс опосредованно повлиял на то, что большинство эмпирических формул для прогноза длины зависающих консолей не отображают влияние сопротивления пород сжатию.

Теперь проанализируем, как рост  $\sigma_{сж}^i$   $i$ -го слоя влияет на изменение нагрузки на механизированную крепь. При весьма низком  $\sigma_{сж}^i \rightarrow 0$  длина устойчивой породной консоли также стремится к нулю ( $l_2^i \rightarrow 0$ ) и практически весь объем  $i$ -го слоя опускается на нижележащие слои – нагрузка на механизированную крепь соответствует некоторому значению  $Q_{i+K}$ , максимальному для данных условий. С ростом  $\sigma_{сж}^i$  увеличивается длина  $l_2^i$  и уменьшается объем  $i$ -го слоя, то есть, наблюдается тенденция, аналогичная влиянию модуля деформации  $E_i$  (см. рис. 7.4, а, участок  $A_0A_1$ ). Однако, здесь интенсивность снижения  $Q(\sigma_{сж}^i)$  гораздо меньше, так как сама устойчивая консоль передает часть своего веса на нижележащие породы в пределах свода формирования нагрузки на крепь. С другой стороны, по вышеуказанным причинам активного роста функции  $l_2^i(\sigma_{сж}^i)$  не может происходить, поскольку изгибающий момент увеличивается гораздо быстрее удерживающего момента  $M_{уд}^i$ ; функция  $l_2^i(\sigma_{сж}^i)$  выполаживается, асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению  $(l_2^i)_{max}$  при  $\sigma_{сж}^i \rightarrow \infty$ . Поэтому стабилизуется и функция  $Q(\sigma_{сж}^i)$  на определенном уровне, несколько меньшем исходного значения  $Q_{i+K}$ . На наш взгляд, главная причина такого ограниченного влияния  $\sigma_{сж}^i$  заключается в том, что этот параметр не вносит существенных изменений в процесс взаимодействия слоев основной кровли и эпюры распределения нагрузок между ними, а, следовательно, в положение контура свода формирования нагрузки на механизированную крепь (см. рис. 6.4).

Аналогичные тенденции отмечаются и при рассмотрении влияния сопротивления сжатию групп породных слоев и всей основной кровли в целом. Поскольку прочностные характеристики литологических разностей углевмещающей толщи Западного Донбасса оцениваются как слабые с относитель-

но небольшим диапазоном изменения, то их воздействие на колебания нагрузки на механизированную крепь следует оценить как несущественное. Исключение могут составить лишь условия залегания в основной кровле достаточно мощного песчаника ( $m_i > 4...5$  м), который при сочетании повышенных прочностных и деформационных характеристик, вероятно замкнет контур свода формирования нагрузки на механизированную крепь; но, такие исключения лишь подтверждают закономерность слабого влияния сопротивления сжатию на процессы сдвижения надугольной толщи в окрестности очистных работ для условий Западного Донбасса.

#### 7.4. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

На заключительном этапе (из группы механических характеристик) рассмотрено влияние реологических свойств породных слоев кровли (как наиболее обобщающих) на механизм формирования нагрузки на механизированную крепь, тем более, что они наиболее выражены именно в слабых породах слоистой углевмещающей толщи, например, Западного Донбасса, а очистные работы развиваются не только в пространстве, но и во времени.

При изучении влияния реологических свойств выделяют, как правило, две тенденции:

– развитие деформаций во времени при постоянной нагрузке, что учитывается в теории упругонаследственной ползучести снижением модуля деформации в зависимости от времени  $t$  приложения нагрузки, а величину длительного модуля деформации  $E_i^\infty$  (при  $t \rightarrow \infty$ ) связывают с его условно-мгновенным значением соотношением

$$E_i^\infty = E_i \left[ 1 - \left( \frac{\chi}{\beta} \right)_i \right], \quad (7.3)$$

где  $\left( \frac{\chi}{\beta} \right)_i$  – реологический показатель  $i$ -го породного слоя;

– снижение во времени  $t$  сопротивления породы сжатию, длительная величина  $\left( \sigma_{сж}^i \right)^\infty$  которого связана с условно-мгновенной величиной  $\sigma_{сж}^i$  соотношением

$$\left( \sigma_{сж}^i \right)^\infty = \sigma_{сж}^i \sqrt{1 - \left( \frac{\chi}{\beta} \right)_i}. \quad (7.4)$$

Приведенные соотношения удобны в использовании, а реологический показатель  $\left(\frac{\chi}{\beta}\right)_i$  детально изучен для пород, например, Западного Донбасса на основе широкомасштабных и многолетних лабораторных исследований [125-127].

Реологический фактор обязателен к учету при рассмотрении процессов сдвижения надугольной толщи по ряду причин:

- во-первых, очистные работы протекают во времени и условно-мгновенное положение забоя отражает лишь одно состояние из бесконечно большого числа положений за определенный (конечный) промежуток времени;
- во-вторых, все литологические разности углевмещающей толщи слабых пород, например, Западного Донбасса характеризуются ярко выраженными реологическими свойствами;
- в-третьих, такие технологические параметры как скорость подвигания  $V$  очистного забоя, время  $t$  его простоев, скорость  $V_K$  подачи углевыемочной машины являются функцией времени;
- в-четвертых, хоть и слабо выражен, но все же проявляется такой фактор как шаг  $L$  посадки основной кровли в слоистом массиве слабых пород, который также имеет временные рамки в процессе подвигания очистного забоя.

Поэтому все указанные параметры и факторы следует рассматривать во взаимосвязи, где одним из объединяющих их условий является время протекания геомеханических процессов в рамках выполнения технологических операций. В первую очередь проанализировано влияние реологических свойств горных пород в части развития во времени их ползучести и связанными с этим явлением снижением сопротивления сжатию и модуля деформации. Эти тенденции способствуют интенсификации опускания слоев кровли, что обуславливает изменение положения двух контуров (см. рис. 6.4), ограничивающих объем пород, нагружающих механизированную крепь: со стороны выработанного пространства – линия изменения знака кривизны изгиба слоев; со стороны очистного забоя – контур свода формирования нагрузки на крепь.

Ранее было установлено, что растущий прогиб слоев, начинающийся с их нижерасположенной части, примыкающей к крепи, снижает реакцию  $q_{i-1}(x)$  на  $i$ -тый слой (см. рис. 7.1, а), его устойчивость также снижается и он обрушивается ближе к нежесткому защемлению – контур свода формирования нагрузки на крепь принимает более вертикальное положение, нагрузка на крепь увеличивается. Причем, все отмеченные факторы (ползучесть,  $E_i(t)$ ,  $\sigma_{сж}^i(t)$ ) действуют в одном направлении: длина консоли  $l_2^i$  уменьшается во времени  $t$  ее нагружения и положение всего контура свода перемещается от условно-начального положения  $C_0$  (время  $t_0$ ) до нового положения



$C_1(t_1 - t_0)$ , как это показано на рис. 7.5. Здесь следует отметить, что изменение длительности воздействия концентраций нагрузок напрямую связано со скоростью  $V$  подвигания очистного забоя, поскольку именно она определяет время прохождения участка длиной  $l_3^i$  (см. рис. 6.4). При остановке очистного комплекса увеличение длительности нагружения крепи соответствует времени простоя плюс предыдущее (перед остановкой) время прохождения участка  $l_3^i$ .

Практикой отмечено, что с увеличением времени простоя комплекса возрастает нагрузка на механизированную крепь, следовательно, растет объем неустойчивых пород, заключенных между линиями  $C_j$  и  $D_j$  на рис. 7.5; в плоском изображении поперечного сечения надугольной толщи нагрузка на крепь будет эквивалентна площади, ограниченной вышеуказанными линиями. При длительном простое ( $t > t_1$ ) забоя породные консоли  $l_2^i$  продолжают укорачиваться в силу развития процесса ползучести слоя и увеличения его прогиба над очистным забоем по ранее приведенному механизму преимущественного снижения реакции  $q_{i-1}(x)$  со стороны нижележащих слоев и возрастания изгибающего момента  $M_i$ . Здесь следует отметить закономерность увеличения деформаций ползучести с ростом интенсивности напряжений, особенно, когда последние приближаются к разрушающим значениям [125-127]. Тогда по мере уменьшения длины устойчивой консоли она приближается к нежесткому защемлению, где возрастает горное давление и реологические свойства проявляются сильнее (см. рис. 6.4). Более того, усиливаются деформации в самом нежестком защемлении, начиная с груди забоя (см. рис. 6.5), и контур свода формирования нагрузки принимает положение, близкое к вертикальному. Изменение положения контура свода ограничивается (при  $t \rightarrow \infty$ ) линией максимумов опорного давления (см. рис. 6.4), где процесс ползучести породных слоев наиболее интенсивен; это положение отражено линией  $C_\infty$  на рис. 7.5 и по разным оценкам характеризуется начальным наклоном контура в сторону нетронутого массива до  $10...15^\circ$ . Таким образом, имеет место тенденция изменения положения контура свода с течением времени нагружения породных консолей  $l_2^i$ . Длительность периода нагружения гораздо выше при остановке очистного забоя, чем при его подвигах с разными скоростями. Тем не менее, значительные различия в скоростях  $V$  подвигания могут привести к существенно разному положению контура свода формирования нагрузки на крепь, ведь время прохождения лавой участка  $l_3^i$  может составлять до нескольких суток, то есть, период, когда наиболее интенсивно растут деформации ползучести [125-127].

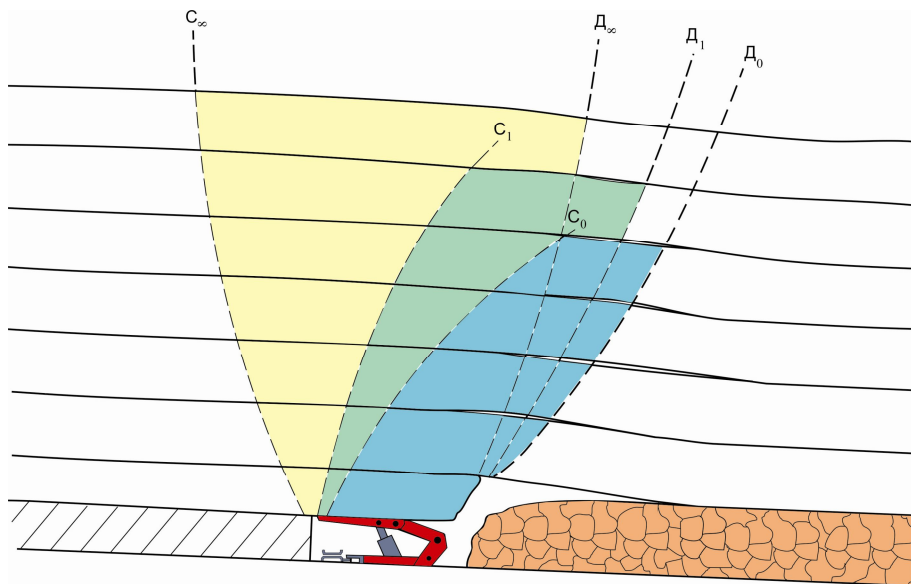


Рис. 7.5. Схематическое представление о формировании нагрузки на крепь во времени (в зависимости от скорости подвигания очистного забоя и продолжительности его остановки)

Теперь рассмотрим во времени положения линии изменения знака кривизны изгиба слоев (см. рис. 6.4) над выработанным пространством, семейство которых показано линиями  $C_j$  и  $D_j$  на рис. 7.5. Существует мнение, что с увеличением скорости  $V$  подвигания очистного забоя возрастает не только длина  $l_2^i$  устойчивой породной консоли, но, благодаря снижению времени  $t$  прохождения участка  $l_3^i$ , его длина увеличивается и линия изменения знака кривизны изгиба смещается в сторону выработанного пространства (положение  $D_0$ ). Действительно, сокращение времени деформирования  $i$ -го слоя над лавой обуславливает уменьшение его прогибов (повышенные прочностные и деформационные характеристики) и удаление точки перегиба слоя от очистного забоя. Механизм влияния реологических свойств и связанных с ними технологических параметров принципиально не отличается для положений линий  $C_j$  и  $D_j$ , однако, есть ряд особенностей, ограничивающих это влияние:

- во-первых, для большинства литотипов деформации ползучести затухают во времени  $t$  приложения нагрузки, которое, безусловно, больше для линий  $D_j$ ;

– во-вторых, сама нагрузка снижается на данном участке из-за расслоения кровли и деформации ползучести также уменьшаются;

– в-третьих, изменение знака кривизны проходит на участке максимального расслоения кровли (см. рис. 6.4 и рис. 7.5), а образовавшиеся полости высотой  $y(x)$  частично компенсируют прогибы, связанные с деформацией ползучести, и условия нагружения слоев на данном участке меняются мало.

В силу указанных причин менее существенны изменения положения линий  $D_j$  во времени протекания процесса сдвижения, поэтому, при росте  $t$  (например, остановка очистного забоя или снижение скорости его подвигания) площадь, заключенная между линиями  $C_j$  и  $D_j$ , увеличивается, – соответственно растет нагрузка на механизированную крепь, что отмечается как при шахтных наблюдениях, так и при аналитическом и лабораторном моделировании процесса. Изложенный механизм влияния скорости  $V$  подвигания очистного забоя и времени  $t$  его остановки через ярко выраженные реологические свойства пород Западного Донбасса в качественном плане изучается в шахтных условиях посредством мониторинга давления в гидростойках секций механизированной крепи и будет исследован (при выполнении следующих этапов работы) на компьютерных моделях процессов сдвижения надугольной толщи при очистной выемке.

### **7.5. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ШАГА ПОСАДКИ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ**

Теперь рассмотрим механизм влияния на формирование нагрузки на крепь других параметров (шаг  $L_{II}$  посадки основной кровли, скорость  $V_K$  подачи углевыемочной машины и ширина захвата  $B$  ее исполнительного органа), которые так или иначе связаны с предыдущими факторами структуры и механических свойств надугольной толщи. Ранее был отмечен слабо выраженный процесс посадки основной кровли в условиях слоистого массива слабых пород, например, Западного Донбасса по причине отсутствия мощных породных консолей со значительной длиной пролета, а основной фактор развития нагрузки на механизированную крепь позиционируется как последовательное опускание тонко- и среднеслоистых слабых пород непосредственно над очистным забоем и в примыкающем участке за секциями крепи. На наш взгляд, отмечаемые иногда на практике случаи активного влияния посадки основной кровли можно объяснить следующим образом. В районе изменения знака кривизны изгиба слоя (см. рис. 6.6) возникает магистральная трещина по всей его мощности. Однако, эти магистральные трещины по разным слоям (в пределах мощности основной кровли) существенно не совпадают друг с другом по координате  $X$  – возникает подобие рас-

порно-блочной системы с опиранием на обрушенные породы с одной стороны и породы, зависающие над крепью, с другой стороны. Эта вторая опора передает часть веса пород распорно-блочной системы на механизированную крепь и нагрузка на нее растет до момента слияния отдельных магистральных трещин в единую по мощности основную кровлю и ее последующего обрушения. Во всех иных случаях посадка основной кровли происходит с незначительными колебаниями нагрузки на механизированную крепь, что многократно зафиксировано при мониторинге давления в гидростойках ее секций. Таким образом, можно считать обоснованным исключение шага  $L_{II}$  посадки основной кровли, состоящей из слабых пород тонко- и среднеслоистой структуры, из перечня основных факторов, наиболее влияющих на формирование нагрузки на крепь.

Что касается таких параметров как скорость подачи  $U_K$  углевыемочной машины и ширина захвата  $B$  ее исполнительного органа, то ряд специалистов отмечает их влияние на процесс сдвижения надугольной толщи и формирование нагрузки на крепь. Здесь, на наш взгляд, следует разделить влияние  $V_K$  и  $B$  на две позиции:

- во-первых, сочетание параметров  $V_K$  и  $B$  с длиной лавы и временем выполнения вспомогательных операций определяет скорость  $V$  продвижения очистного забоя и через нее опосредовано влияют на процесс сдвижения надугольной толщи, что уже рассмотрено выше;

- во-вторых, имеется локальное изменение НДС породных слоев кровли в районе «кутовой» части забоя, где производится выемка угля. Вторая позиция тесно связана со структурой и механическими характеристиками породных слоев, примыкающих к угольному пласту, то есть, большей частью породами непосредственной кровли. Действительно, процесс ее обрушения, как и расслоения вышележащих пород, происходит во времени и, учитывая существующие скорости подачи углевыемочных комбайнов (несколько метров в минуту), можно предположить, что только при малых  $V_K$  (при соответствующей ширине захвата, обычно равной  $B = 0,63...0,8$  м) будет наблюдаться более-менее существенное опускание непосредственной кровли вслед за ее обнажением до передвижки секций крепи; процесс усиливается при остановке комбайна. Здесь возмущения поля напряжений в локальной области по длине лавы до 15...20 м действуют небольшой промежуток времени (обычно до 10 минут) и не успевают существенно измениться общие (для всей лавы) процессы формирования нагрузки на крепь. Для струговых установок с малой шириной захвата (обычно  $B \leq 100$  мм) и высокими скоростями движения исполнительного органа (десятки метров в минуту) влияние рассматриваемых параметров еще меньше, что постоянно фиксируется при мониторинге давления в гидростойках механизированной крепи стругового очистного комплекса. Тем не менее, при последующих исследованиях предусмотрена разработка серии моделей для анализа НДС углевымещающего

массива при разной скорости подачи  $V_K$  углелевочной машины и ее ширины  $B$  захвата. Эти исследования необходимы для количественного установления степени влияния параметров  $V_K$  и  $B$ .

## 7.6. МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИИ ОТПОРА КРЕПИ ПРИ СДВИЖЕНИИ СЛОИСТОЙ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ СЛАБЫХ ПОРОД

Заключительный этап исследований механизма развития нагрузки на механизированную крепь посвящен анализу влияния реакции  $P$  ее отпора на процесс сдвижения кровли над очистным забоем. Считается обоснованным общепринятое утверждение о послойном опускании слоев кровли, начиная с непосредственной на контакте с крепью и распространяющееся в основную кровлю до стабилизации формирования нагрузки  $Q$  (замыкание контура, образованного линиями  $C_j$  и  $D_j$  на рис. 7.5). В этой связи проследим влияние реакции  $P$  отпора механизированной крепи на изменение положений линий  $C_j$  и  $D_j$ . Согласно выработанным представлениям реакция  $q_{i-1}(x)$  на первый слой ( $i=1$ ,  $q_0(x)=P$ ) повышает его устойчивость, изгибающий момент в нем снижается (см. рис. 7.1), что способствует увеличению длины  $l_2^1$  зависающей консоли. Это, в свою очередь, увеличивает реакцию  $q_1(x)$  на второй слой ( $i=2$ ), возросшая устойчивость которого приводит к удлинению консоли  $l_2^2$  и так далее по вышележащим слоям, хотя степень влияния реакции  $l_2^1$  отпора крепи с удалением в кровлю снижается. Таким образом, с увеличением реакции отпора крепи линия  $P$  перемещается в сторону выработанного пространства (см. рис. 7.5) и вес пород внутри свода формирования нагрузки на крепь снижается. С другой стороны, положение линии  $D_j$  изменения знака кривизны изгиба меняется в меньшей степени по причине ее более удаленного расположения от механизированной крепи и сущности самого процесса «перегиба» слоев, где основным фактором является длина пролета породной плиты, а не эпюры реакции в ее опорах. Кроме того, реакция  $P$  отпора мало сказывается на процессе закрытия полостей между слоями, которые имеют наибольшее раскрытие как раз на участках «перегиба». Тогда с увеличением реакции  $P$  сопротивления механизированной крепи нагрузка  $Q$  на нее от веса опускающихся пород кровли снижается, что схематично отражено на рис. 7.6, а. При такой закономерности рациональное значение реакции  $P_p$  отпора крепи будет таким, при котором в кровле формируется свод с весом пород  $Q_p$ , равным  $P_p$ ; в любой другой ситуации

будет выше либо реакция крепи ( $P > P_p$  при  $Q < Q_p$  – правая часть линий от точек 1, 2, 3), либо нагрузка на крепь ( $P < P_p$  при  $Q > Q_p$  – левая часть линий), для уравнивания которой все равно будет происходить рост  $P$ .

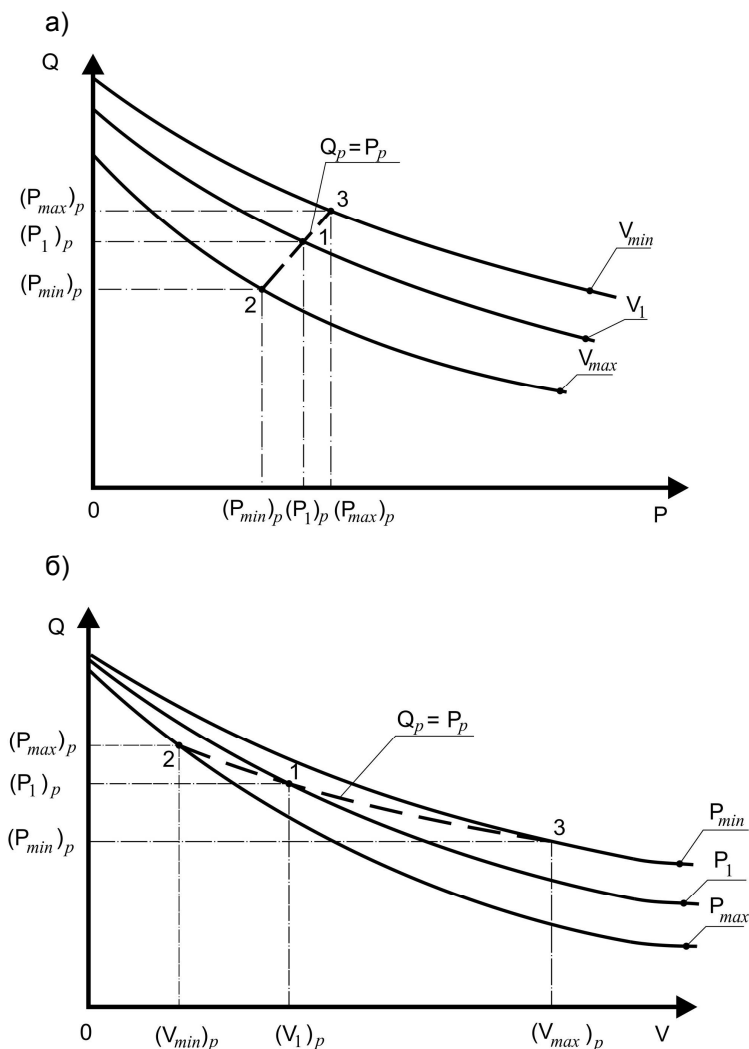


Рис. 7.6. Качественные закономерности влияния реакции отпора  $P$  механизированной крепи на формирование нагрузки  $Q$  от веса опускающихся пород (а) и изменения рациональной реакции отпора  $P_p$  в зависимости от скорости  $V$  подвигания очистного забоя (б)

Безусловно, на приведенную закономерность будут влиять другие факторы, например, скорость  $V$  подвигания очистного забоя; тогда получаем семейство функций  $Q(P)$ , для которых при каждом значении  $V$  имеется свое рациональное значение  $P_p$  (см. рис. 7.6). В итоге, существует закономерность (пунктирная линия) изменения рационального значения реакции  $P_p(V)$  от скорости подвигания очистного забоя. Эта закономерность будет видоизменяться от степени проявлений других влияющих факторов (структура и свойства пород кровли, глубина разработки и тому подобное), но в пределах определенного участка условно-стабильной геомеханической ситуации закономерность  $P_p(V)$  позволяет оперативно регулировать технологические параметры очистных работ с целью предотвращения аварийного положения перегрузки механизированной крепи и посадки очистного комплекса на «жесткую базу».

Вполне очевидно, что в данном разделе рассмотрены общие тенденции и качественные закономерности влияния основных параметров на нагружение механизированной крепи; каждая из описанных закономерностей требует развития и углубления в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях отработки пологих угольных пластов. Тем не менее, получен инструмент системного планирования исследований как в шахтных условиях (мониторинг работы углевыемочного оборудования), так и математического моделирования процессов очистных работ с применением современной компьютерной техники и новейшего программного обеспечения.

## **8. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ ПОРОД С УГЛЕДОБЫВАЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ**

### **8.1. МЕТОДОЛОГИЯ НОВОГО ПОДХОДА К ВЫЯВЛЕНИЮ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКИ С КРЕПЬЮ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ**

Задача выбора рациональных технологических и режимных параметров ведения очистных работ с учетом структуры и свойств углевмещающего массива далеко не нова и в различных постановках и вариантах подходов активно изучается, начиная со второй половины XX века. Накопленный опыт исследований в различных горно-геологических условиях указывает на группу факторов, влияющих на проявления горного давления в лаве, состояние механизированной крепи и ритмичную высокопроизводительную работу очистного комплекса в целом. Основными факторами являются: длина  $L$  очистного забоя, его среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания, шаг  $l$  обрушения (посадки) основной кровли, скорость подачи  $V_K$  и ширина  $B$  захвата исполнительного органа углевыемочной машины, время  $t$  вынужденных простоев лавы, структура и свойства  $C$  углевмещающего массива. Последнее из перечисленных факторов не поддаются регулированию, но обязательны к учету при прогнозе проявлений горного давления как исходные геомеханические параметры для управления другими технологическими и режимными параметрами очистной выемки угля. Длина лавы, как отмечает ряд исследователей, влияет на состояние углевмещающей толщи, но она, как правило, приурочена к техническим характеристикам применяемого очистного оборудования и имеет дискретно-ограниченный диапазон регулирования. Ширина захвата углевыемочной машины также определяется ее конструкцией и напрямую связана с применяемым очистным оборудованием. Шаг обрушения основной кровли является функцией геомеханических параметров (структура и свойства пород надугольной толщи, глубина разработки и тому подобное), но, тем не менее, поддается некоторому управлению за счет изменения пролета зависающих породных консолей в выработанном пространстве и угла полных сдвижений, как это установлено рядом исследователей. Два взаимосвязанных параметра – скорость подвигания очистного забоя и скорость подачи углевыемочной машины поддаются регулированию в широком диапазоне изменения значений; также можно управлять временем вынужденных простоев, определяемым не только аварийными ситуациями, некоторые из которых можно спрогнозировать и предотвратить



хоть частично, но и организационно-техническими факторами надлежащего выполнения технического регламента. Указанные параметры целесообразно и необходимо регулировать в соответствии с горно-геологической ситуацией ведения очистных работ на основе установления закономерностей их многофакторной связи с геомеханическими, технологическими и техническими параметрами высокопроизводительной выемки угля.

Задача установления многофакторных закономерностей связи проявлений горного давления с геомеханическими, технологическими и техническими параметрами очистной выемки решается комплексно на основе сочетания и взаимного дополнения по следующим направлениям исследований:

- анализ и обобщение существующих результатов исследований закономерностей связи по парным параметрам (например, длина зависающих породных консолей и скорость подвигания лавы), полученным в ходе аналитических расчетов, моделирования НДС массива с помощью вычислительной техники, моделирования геомеханических процессов на эквивалентных материалах и шахтных исследований процессов сдвижения надугольной толщи;

- непосредственного измерения нагрузок на секции крепи через мониторинг давления в их гидростойках, что является принципиально новым направлением изучения состояния современных механизированных комплексов, оборудованных системами управления процессами очистной выемки; поступающая информация от датчиков системы управления позволяет в шахтных условиях в «режиме реального времени» отслеживать характер нагружения механизированной крепи в разной горно-геологической ситуации при изменении значений влияющих факторов;

- моделирование с использованием современных компьютерных программ процессов сдвижения надугольной толщи; учет в модели основных влияющих факторов осуществляется на основе накопленных результатов предыдущих исследований, выявленных при мониторинге особенностей работы очистных комплексов с учетом изменяющейся структуры углевмещающего массива по длине выемочного участка; поскольку основные регулируемые параметры являются функциями времени, то возникает задача нового уровня – развитие геомеханических процессов во времени и пространстве с учетом реологических свойств пород надугольной толщи.

Вышеприведенные позиции комплексного подхода, по нашему мнению, позволяют наиболее достоверно адекватно реальным условиям отразить протекающие геомеханические процессы в очистном забое и повысить надежность рекомендаций по высокопроизводительной и безопасной отработке выемочных участков на пологих угольных пластах Донбасса.

Методология нового подхода базируется на главной концепции – регулярный мониторинг давления в гидростойках секций механизированной крепи как наиболее объективной информации о проявлениях горного давления в очистном забое в зависимости от текущих значений основных влияющих факторов и геомеханических параметров на данный момент времени. Для всестороннего отражения процессов сдвижения надугольной толщи следует

установить две группы закономерностей – зависимость  $Q(V_c)$  нагрузки  $Q$  на секции крепи от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя и зависимости  $Q(t)$  роста нагрузки от времени  $t$  простоя лавы, – каждая из которых подразделяется на семейство зависимостей влияния отдельных факторов. Поскольку изучается конкретный выемочный участок, оснащенный конкретным углевыемочным оборудованием, то длина лавы  $L$  и ширина захвата  $B$  исполнительного органа будут постоянными величинами, а скорость подачи углевыемочной машины  $V_K$  является зависимым параметром и входит в интегральном виде в скорость движения очистного забоя. Тогда представляют наибольший интерес следующие зависимости. Для первой группы закономерностей  $Q(V_c)$ :

- распределение нагрузки  $Q$  на секции по длине  $L$  лавы (координата  $0 \leq Z \leq L$ ) при разной среднесуточной  $V_c$  ее подвигания, то есть, для каждой  $i$ -той секции устанавливается своя функция  $Q_i(V_c)$ ;
- распределение нагрузки  $Q_i$  на  $i$ -той секцию по мере движения очистного забоя и соответствующего изменения структуры  $C$  надугольной толщи по длине (координата  $X$ ) выемочного участка;
- распределение нагрузки  $Q_i$  на  $i$ -тую секцию в пределах шага посадки ( $0 \leq X \leq l$ ) основной кровли;
- распределение нагрузки  $Q(Z)$  по мере отработки выемочного участка по восстанию пласта и уменьшения при этом глубины  $H$ ;
- распределение нагрузки  $Q_i$  в зависимости от положения  $\delta_i$  секции относительно груди забоя.

Таким образом, многопараметрическую связь можно представить в виде функции

$$Q = \Phi_1(V_c, Z, X, C, l, H, \delta_i), \quad (8.1)$$

где  $C$  – параметра структуры и механических свойств углевлещающего массива.

Такая функция достаточно сложна, вероятно, отчасти неоднозначна и трудоемка для анализа и выработки рекомендаций. Поэтому целесообразно, на наш взгляд, сначала устанавливать отдельные парные закономерности, а затем применять методы множественного корреляционного дисперсного анализа для учета основных влияющих факторов. Также будет полезным разделение интервалов изменения каждого из параметров на наиболее характерные участки вдоль лавы и получение усредненных закономерностей для каждого из этих участков с тем, чтобы избежать громоздкости и неоднозначности последующего анализа при сохранении объективности отражаемых геомеханических процессов.

Вторая группа закономерностей  $Q(t)$  разделяется на следующее семей-

ство зависимостей:

- распределение нагрузки  $Q_i$  на  $i$ -тую секцию по длине лавы ( $0 \leq Z \leq L$ ) в зависимости от времени  $t$  простоя;
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания забоя до его остановки;
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от координаты  $X$  по длине выемочного участка, характеризующей конкретную структуру  $C$  надугольной толщи и глубину  $H$  расположения лавы на момент остановки;
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от расстояния  $\delta$  секции до груди забоя (положение секции по величине задвижки штока гидродомкрата);
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от положения  $\delta_{i\pm 1}$  соседних секций (по отношению к груди забоя) и величины их распора (давление  $P_{i\pm 1}$  в поршневых полостях гидростоек);
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от соседних секций с весьма низким распором  $P_{min}$  (секции требуют ремонта);
- распределение нагрузки  $Q_i$  во времени  $t$  простоя в зависимости от положения  $X$  лавы по отношению к шагу  $l$  и координате последней посадки основной кровли.

Такую многопараметрическую связь по аналогии с предыдущей (8.1) также можно представить в виде

$$Q = \Phi_2(t, Z, X, C, H, \delta_i, \delta_{i\pm 1}, P_{i\pm 1}, P_{min}, l), \quad (8.2)$$

Здесь выполняются те же операции по установлению парных уравнений регрессии, затем зависимостей множественной корреляции от основных влияющих параметров и усреднение полученных закономерностей по характерным интервалам изменения основных геомеханических и технологических параметров.

Главный источник информации для установления описанных выше закономерностей – это регулярный съем показаний давления  $P_i$  в поршневых полостях гидростоек секций крепи, данные горно-геологического прогноза и испытаний механических свойств литологических разностей углевмещающего массива, технологические показатели работы выемочного участка. Чтобы сформировать базу данных для выполнения корреляционно-дисперсного анализа необходима одновременная фиксация следующих показателей в «режиме реального времени»:

- давление  $P_i$  в гидростойках  $i$ -той секции;
- среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания очистного забоя за истекшие

сутки и в течении предыдущей недели;

- положение забоя (координата  $X$ ) на момент измерения давления – определяется соответствующая структура  $C$  надугольной толщи, глубина  $H$  расположения лавы и расстояние после последней посадки кровли;

- время  $t$ , прошедшее после остановки забоя (если такая остановка произошла);

- положение  $\delta_i$  секций относительно груди забоя.

Вполне естественно, что сформированная база данных касается только конкретного выемочного участка (или нескольких участков, где производился съем данных) и стоит задача распространения закономерностей на другие горно-геологические и горнотехнические условия. Здесь для расширения области адекватного и достоверного применения рекомендаций необходимо также моделирование состояния углевмещающей толщи в широком диапазоне изменения влияющих факторов, которое выполняется апробированным методом конечных элементов с использованием современных компьютерных программ. Причем, в процессе компьютерного моделирования используются выявленные (при мониторинге работы очистных комплексов) особенности геомеханических процессов сдвижения надугольной толщи в зависимости от основных влияющих факторов. Таким образом, осуществляется сочетание более универсального численного метода исследований (компьютерное моделирование) с конкретными экспериментальными зависимостями, в результате которого корректируется компьютерная геомеханическая модель, с одной стороны, и расширяется область достоверного распространения экспериментальных закономерностей, с другой стороны.

Разработанная методология принципиально отличается от существующих своей новизной по таким позициям как постоянный мониторинг параметров работы углевмещающего комплекса в сочетании с компьютерным моделированием геомеханических процессов в пространственной постановке с учетом временного фактора – исследуется пространственная реологическая модель поведения углевмещающей толщи.

## **8.2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКИ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Методика установления закономерностей формирования нагрузки на секции крепи разработана с учетом двух групп факторов:

- геологическая среда, под которой подразумевается структура  $C$  надугольной толщи (с усредненными значениями механических характеристик каждого слоя) и глубина  $H$  размещения участка лавы, на котором снимаются показания в гидростойках на данный момент времени;

– скорость  $V_K$  подачи углевыемочной машины и ширина  $B$  захвата ее исполнительного органа.

В отличие от второй составляющей исследований – компьютерного моделирования геомеханических процессов – в ходе мониторинга работы очистного комплекса представляет значительные трудности выделить влияние одного какого-либо параметра, так как другие неразрывно связаны с процессом очистной выемки и постоянно изменяются в пространстве и во времени. Это особенно касается разделения влияния первой группы факторов – структуры  $C$  надугольной толщи и глубины  $H$  расположения лавы; ведь они изменяются одновременно, не говоря о колебаниях других параметров, среди которых следует выделить дисперсию механических характеристик слоев надугольной толщи, неразрывно связанных с ее структурой. Вполне понятно, что при каждом съеме показаний давления  $P$  в гидростойках секций крепи не представляется возможным определить соответствующие механические характеристики породных слоев в кровле; более того, свойства основной кровли определяются только на основе геологических изысканий при бурении скважин. Поэтому принято единственно доступное решение – усреднить механические свойства каждого слоя, тем более, что они в пределах выемочного участка достаточно стабильны в рамках диапазона колебаний, характерных для данных литологических разностей. Наиболее резкие изменения механических характеристик связаны с замещением одного литотипа другим, которые предложено учитывать фиксацией структуры надугольной толщи при каждом съеме показаний давления  $P$ . Это осуществляется по карте горно-геологического прогноза в пределах выемочного участка следующим образом.

В первую очередь следует исключить влияние таких технологических параметров, как скорость  $V$  подвигания лавы и продолжительность  $t$  ее остановки; поэтому выбирался участок по длине выемочного столба с достаточно стабильной  $V$  и отсутствием каких-либо простоев очистного забоя. Во вторую очередь отметим, что глубина разработки  $H$  меняется несущественно, так как угол падения пласта, например,  $C_6$  составляет в среднем  $4^\circ$  и по длине столба 100 м вертикальное горное давление  $\sigma_y = \gamma H$  изменяется всего на 1,4...2,3% в зависимости от текущего положения лавы. Это облегчает подбор участков для съема показаний  $P$ , которые отличаются существенным изменением структуры основной кровли:

- замещение алевролита песчаником ниже пласта  $C_6^1$ ;
- приближающиеся к крайним значениям (минимум, максимум) мощности слоев кровли от пласта  $C_6$  до пласта  $C_6^1$ , которые могут отличаться в несколько раз.

Учет влияния глубины  $H$  расположения лавы построен на обработке данных, полученных на протяжении практически всей длины столба; в пре-

деле глубина размещения очистного забоя изменяется от 490 м в начале столба до 300 м в его конце – диапазон колебаний  $\gamma H$  составляет 63,3%, что позволяет зафиксировать изменения процесса нагружения секций крепи, если таковые будут отмечены. Предложено влияние глубины  $H$  (возможно) зафиксировать, когда разница в вертикальных отметках будет порядка 10% и в соответствии с этим расстояние по длине столба для отбора данных колеблется в пределах 400...700 м. Помимо этого существуют еще три достаточно строгих условия для отбора данных мониторинга. *Первое* – структура кровли (по мощности до пласта  $C_6^1$ ) должна быть примерно одинакова, то есть без замещения литотипов и при отличиях мощностей каждого до 25...30 %. *Второе* – скорость продвижения очистного забоя должна быть достаточно стабильной с колебаниями в пределах  $\pm 10\%$ . *Третье* – в период съема показаний в течение 2-3 суток не должно происходить ни одной сколь-нибудь продолжительной остановки забоя, связанной с ремонтом оборудования или аварийной ситуацией по другим причинам.

Теперь рассмотрим методологию съема показаний давления  $P$  в гидростойках секций крепи при установлении закономерностей влияния скорости  $V_K$  подачи углевыемочной машины и ширины захвата  $B$  ее исполнительного органа. Например, в случае, когда конкретные условия проведения мониторинга связаны с конкретной углевыемочной машиной – стругом и его конструктивно-технологическими параметрами. По своей технической характеристике струговой комплекс имеет две скорости подачи  $V_K = 0,66$  м/с (39,6 м/мин) и  $V_K = 0,92$  м/с (55,2 м/мин). С учетом периодических концевых операций и других остановок струга средняя скорость его подачи составляет от 20...25 м/мин до режимной скорости подачи (обычно очистные работы ведутся на первой скорости струга  $V_K = 0,66$  м/с) за один проход по длине лавы. Ширина захвата струга изменяется от  $B = 50$  мм (по вылету забойных резцов) до  $B = 150$  мм, когда практически вся режущая часть струга (включая кутковые резцы) участвует в отделении угля от массива. Изменение ширины захвата в процессе движения струга практически не поддается контролю, поэтому принято его значение  $B = 50...70$  мм по опыту работы комплекса, например, в 161-й лаве ПСП «Шахта «Степная».

Здесь, в связи с мониторингом конкретного оборудования в конкретных условиях, возникают следующие предложения по изучению влияния  $V_K$  и  $B$ . Существенно различная ширина захвата исполнительного органа будет только у разных типов углевыемочных машин и, соответственно, у разных механизированных комплексов, в связи с чем в шахтных исследованиях проследить влияние  $B$  возможно только при мониторинге серии разного углевыемочного оборудования, которое, в случае оснащения аналогичными системами управления, позволит в перспективе экспериментально зафиксировать закономерности влияния ширины захвата исполнительного органа. Поэтому на данном этапе исследований вариация ширины захвата  $B$  осуще-

ствляется путем компьютерного моделирования очистных работ, но, с учетом экспериментально установленных закономерностей влияния других геомеханических и технологических параметров.

Влияние скорости подачи  $V_K$  (в основном усредненной по длине лавы) можно отслеживать в процессе мониторинга работы струговой лавы, но в вышеуказанном диапазоне. В то же время известно, что многократно меньшая скорость подачи  $V_K$  характерна для угольных комбайнов и этот диапазон  $V_K$  экспериментально можно изучать только на соответствующем оборудовании. Поэтому вариация  $V_K$  в более широком диапазоне в рамках настоящей работы изучается только на базе компьютерного моделирования.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих представлений о процессах деформирования пород кровли в районе очистного забоя, а также предварительные результаты компьютерного моделирования и мониторинга давления в гидростойках секций механизированной крепи позволил разработать схему сдвижения надугольной толщи применительно к особенностям слоистого массива слабых пород, например, Западного Донбасса.

2. Рассмотрен механизм формирования нагрузки на механизированную крепь в зависимости от основных влияющих факторов (как геомеханического, так и технологического порядка), который базируется на основной особенности отработки угольных пластов в слоистом массиве слабых пород, например, в Западном Донбассе – нагружение крепи в значительной степени обусловлено не зависающими над ней породными консолями с последующим их обрушением, а последовательным (по мощности основной кровли) опусканием преимущественно тонко- и среднеслоистых пород с ярко выраженными реологическими свойствами и практически полным отсутствием сцепления между слоями.

3. В соответствии с разработанным механизмом нагружения механизированной крепи обосновано положение, что формирующаяся нагрузка на крепь очистного комплекса определяется координатами двух границ (в поперечном сечении лавы): со стороны выработанного пространства – линией изменения знака кривизны изгиба слоев, начинающейся практически сразу за ограждением секций крепи; со стороны груди забоя – контур свода формирования нагрузки на крепь, сложенный из сохранивших устойчивость «остатков» породных консолей.

4. Раскрыт механизм влияния на процесс формирования нагрузки на крепь геомеханических (структура и механические характеристики пород кровли, включая их реологические свойства) и технологических (скорость подвигания очистного забоя и время его остановок, скорость подачи углевыемочной машины и ширина захвата ее исполнительного органа, шаг посадки основной кровли и реакция отпора крепи) параметров ведения очистных работ.

4. Рассмотренные общие тенденции и качественные закономерности влияния геомеханических и технологических параметров на нагружение механизированной крепи представляют собой инструмент системного планирования исследований как в шахтных условиях посредством мониторинга работы углевыемочного оборудования, так и математического моделирования процессов очистных работ с применением современной компьютерной техники и новейшего программного обеспечения.



## 9. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НАГРУЖЕНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

### 9.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОСТОЙКАХ КРЕПИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

В соответствии с изложенной методологией был проведен сбор информации по показаниям давления  $P_i$  в гидростойках каждой секции по всей длине  $L$  лавы при разной среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя. Общие положения предыдущего подраздела 8 нуждаются в конкретизации в плане существенного ограничения (а, по-возможности и полного исключения) влияния других факторов при установлении закономерностей  $P_i(V_c)$  для отдельной секции и  $P(V, Z)$  для механизированной крепи по всей длине  $L$  лавы ( $0 \leq Z \leq L$ ). Здесь имеется ввиду следующее: необходимо использовать такие показания давления  $P_i$  при разных скоростях  $V_c$ , при которых все остальные параметры в уравнении (8.1) будут постоянными или изменяться незначительно; тогда представляется возможным определить истинную связь давления  $P_i$  в гидростойках со скоростью подвигания очистного забоя. Для выполнения сформулированного условия проанализированы возможности ограничения влияния каждого из параметров в уравнении (8.1):  $X$  – координата положения лавы в пределах выемочного участка, от которой зависят структура  $C$  надугольной толщи (при практически постоянных механических характеристиках литологических разностей), глубина  $H$  разработки и расстояние до последней посадки основной кровли (влияние шага  $l$  посадки основной кровли);  $\delta_i$  – расстояние секции до груди забоя, которое зависит от величины раздвижки штока гидродомкрата секции крепи. Положение секции  $\delta_i$  по отношению к груди забоя многократно повторяется (от 6-8 до 14-17 раз за сутки), поэтому в течении одних суток выбирается три одинаковых положения секций и рассчитывается среднее значение по трем измерениям давления  $P_i$  в гидростойках при данной среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя. Затем в течении ближайших нескольких суток при другом значении  $V_c$  съем данных по давлению  $P_i$  повторяется. При этом изменение глубины  $H$  расположения лавы незначительно (порядка 0,2-0,5%), структура надугольной толщи также изменяется малосущественно, а расстояние до последней посадки основной кровли является величиной одного порядка со значением суточного подвигания забоя. Поэтому по параметру  $l$  принимается компромиссное решение – если структура надуголь-

ной толщи в пределах двух-трех шагов  $l$  посадки основной кровли относительно постоянна, то используются показания давления  $P_i$  за те сутки, когда отход лавы от предыдущей посадки основной кровли был, примерно, одинаковым с предыдущими измерениями; если структура надугольной толщи существенно меняется, то измерение  $P_i$  не учитываются при построении зависимости  $P_i(V_c)$ , но будет использовано при построении функции  $P_i(C)$ ; в последнем случае выбираются другие данные измерений  $P_i$  при, примерно, постоянной структуре надугольной толщи и одинаковом отходе лавы от предыдущей посадки основной кровли.

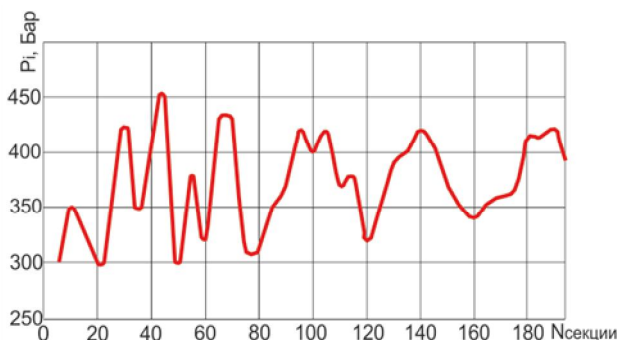


Рис. 9.1. Изменение давления  $P_i$  в гидростойках секций по длине лавы

По приведенному условию минимального влияния условно-постоянных параметров  $C$ ,  $H$  и  $l$  было построено семейство графиков зависимостей  $P_i(V_c)$  и  $P(Z, V_c)$ , в ходе анализа которых выявлен ряд особенностей. На рис. 1.4 показана зависимость изменения давления в гидростойках секций по длине лавы, где на первый взгляд не прослеживается сколь-нибудь четких закономерностей влияния какого-либо параметра. Очевидно, зависимость  $P(Z)$  необходимо преобразовать минимизируя влияние всех остальных параметров (кроме  $Z$  или, как указано на рис. 9.1, номеров секций по длине лавы), переводя их в категорию условно-постоянных выбором соответствующих периодов времени съема показаний  $P_i$ . Здесь первым этапом является разделение всех секций на группы по их положению  $\delta$  по отношению к груди забоя (величина выдвигения штока гидродомкрата плюс конструктивное расстояние в 317 мм между забоем и кромкой консоли перекрытия секции). Тогда минимальное расстояние секций от груди забоя составляет  $\delta_{min} = 317$  мм, а максимальное  $\delta_{max} = 1067$  мм; в этом интервале секции расчленены на три группы:  $\delta \leq 0,5$  м;  $0,5 \text{ м} < \delta \leq 0,8$  м;  $\delta > 0,8$  м. При таком разделении функции  $P_i(Z)$  увеличивается длина периода, уменьшается амплитуда ее колебаний по длине лавы и она становится более гладкой

(рис. 9.2) и информативной для анализа связи параметров  $P_i$  и  $Z$  при разных значениях  $\delta$ . Еще большее сглаживание функции  $P_i(Z)$  придает усреднение значения  $P_i$  по трем замерам одинакового положения секций по отношению к груди забоя. Анализ зависимостей  $P_i(Z)$  дал результаты, несколько отличающиеся от существующих представлений об особенностях формирования нагрузки по длине лавы [90-92].

Традиционные схемы сдвижения пород надугольной толщи исходят из представлений о неравномерном распределении нагрузки  $Q_i$  на секции крепи вдоль лавы: в окрестности выемочных выработок штреков со стороны нетронутого массива (боковые краевые части пласта) формируется зона опорного давления ( $\sigma_y > \gamma H$ ), многократно превышающего исходную величину вертикальных напряжений  $\sigma_y = \gamma H$  ( $\gamma$  – средневзвешенный объемный вес пород надугольной толщи); на концевых участках лавы происходит разгрузка пород ( $\sigma_y < \gamma H$ ); по мере движения к центральной части лавы нагрузка возрастает, что объясняется увеличением высоты зоны полных сдвижений. Такие представления складывались многими десятилетиями и в целом отражают механизм проявлений горного давления; однако, в конкретном случае работы струговой лавы с достаточно высокими скоростями ее подвигания возникает ряд особенностей, которые, на наш взгляд, обусловлены двумя причинами.

*Во-первых*, все аномальные зоны горного давления формируются в течении определенного периода времени. Например, свод полных сдвижений замыкается в надугольной толще на некотором расстоянии от очистного забоя и чем выше его скорость подвигания  $V_c$ , тем дальше от забоя будет окончательно формироваться эта зона. В любом случае, в классических схемах сдвижения надугольной толщи рассматриваются аномальные зоны уже позади лавы (исключая опережающую зону опорного давления) в выработанном пространстве; в проведенных же исследованиях измерялось давление  $P_i$  в гидростойках (как эквивалент нагрузки на секции крепи) непосредственно в рабочем пространстве лавы, где протекает только второй период (первый – формирование зоны опорного давления впереди лавы) опускания надугольной толщи и ее расслоения. Здесь вероятно обрушение максимум непосредственной кровли, а в основной идет зарождение трещин и образование полостей, формирующих шарнирно-блоковую структуру. К тому же, следует учитывать сдерживающее влияние груди забоя на опускание породных слоев кровли. Поэтому распределение давления  $P_i(Z)$  в гидростойках секций крепи вдоль лавы будет отличаться от существующих представлений о характере изменения вертикального горного давления  $\sigma_y(Z)$  по ширине выемочного участка.

*Во-вторых*, линия забоя при струговой выемке имеет выпуклую форму,

которая, сама по себе, более устойчива в плане сопротивления повышенному горному давлению в центральной части лавы. Здесь увеличение высоты свода полных сдвижений повышает горное давление, которому успешно сопротивляется наиболее выпуклая часть груди забоя, отодвигающая окончание формирования свода полных сдвижений в глубь выработанного пространства.

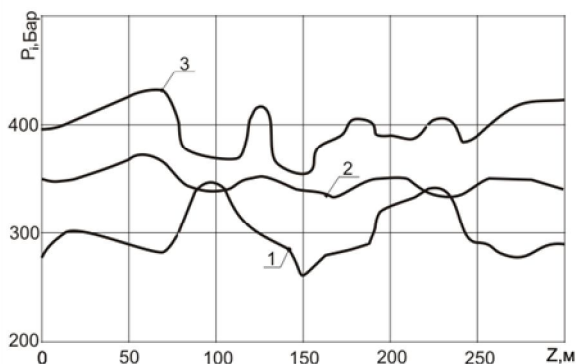


Рис. 9.2. Изменение давления  $P_i$  в гидростойках секций по длине  $Z$  лавы в зависимости от их расстояния до груди забоя:

- 1 –  $\delta \leq 0,5$  м;
- 2 –  $0,5 \text{ м} < \delta \leq 0,8$  м;
- 3 –  $\delta > 0,8$  м

Повышенное внимание указанным факторам уделено по причине неоднородного характера распределения нагрузки  $Q(Z)$  по длине струговой лавы, многократно экспериментально зафиксированного через съем показаний давления  $P_i$  в гидростойках секций. Пример такого распределения показан на рис. 9.1 и, обобщая выполненные измерения, можно утверждать, что как максимумы, так и минимумы давления в гидростойках секций могут располагаться на любых участках по длине лавы. Разделение секций механизированной крепи на группы по положению  $\delta$  относительно груди забоя (см. рис. 9.2) в определенной степени выравнивает функцию  $P(Z)$ , однако, здесь также не выявлено какой-либо стабильно повторяющейся закономерности изменения давления по длине лавы. Относительно параметра  $\delta$ , напротив, выявлена постоянно действующая закономерность пониженного давления  $P_i$  в задвинутых (к груди забоя) секциях и роста давления по мере увеличения отставания  $\delta$  секций от груди забоя. Так, для первой группы секций ( $\delta \leq 0,5$  м) диапазон изменения давления составляет  $P = 262...345$  Бар, для секций, занимающих промежуточное положение ( $0,5 \text{ м} < \delta \leq 0,8$  м), давление возрастает до  $P = 336...374$  Бар, а его максимум  $P = 353...432$  Бар наблюдается для отстающих от груди забоя секций на расстоянии  $\delta > 0,8$  м. Эта тенденция указывает на активный процесс опускания породных слоев (не только непосредственной, но и основной кровли) уже в рабочем пространстве лавы, где небольшое отставание секций от груди забоя вызывает существенный рост нагрузки. Очевидно, главная причина этого явления – слабые,

преимущественно тонкослоистые, породы надугольной толщи с интенсивной трещиноватостью при наличии обводненных литологических разностей, что необходимо учесть в разрабатываемой геомеханической модели сдвижения массива при очистной выемке.

Как указывалось ранее, устойчивой закономерности изменения давления  $P_i$  по длине лавы не обнаружено при струговой очистной выемке в условиях слабометаморфизованных пород Западного Донбасса; возмущения функции  $P(Z)$  от среднего значения составляет 5-14% и, скорее всего, обусловлены изменениями структуры надугольной толщи вдоль лавы. Следовательно, нельзя указать на наиболее опасные участки проявлений горного давления вдоль лавы и в этом смысле координату  $Z$  ее длины можно исключить из группы влияющих факторов, а геомеханическую модель упростить отражением произвольного участка длины лавы.

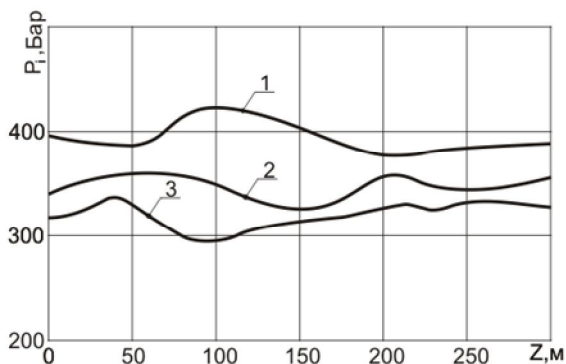


Рис. 9.3. Изменение усредненных значений давлений  $P$  в гидростойках секций по длине  $Z$  лавы от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя:  
1 –  $V_c = 3,2$  м/сут.;  
2 –  $V_c = 7,7$  м/сут.;  
3 –  $V_c = 11,4$  м/сут.

Вторая часть исследований данного этапа была посвящена выявлению закономерностей изменения давления  $P$  в поршневых полостях гидростоек секций в зависимости от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя по описанной выше методологии. Чтобы получить более общие закономерности  $P(V_c)$  было проведено усреднение давления  $P_i$  по группам соседних секций в количестве 12-15 штук; в эти группы входят секции с разным положением относительно груди забоя, что исключает резкие перепады давлений  $P_i$  (на коротком участке по координате  $Z$ ) и в интегральном виде дает представление о степени влияния скорости  $V_c$  нагружения на крепи в целом. На рис. 9.3 представлены графики изменения усредненного давления  $P$  (по группам секций) по длине  $Z$  лавы в зависимости от ее среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания, которую удалось зафиксировать тремя значениями (3,2; 7,7; 11,4 м/сут) при условии минимального влияния других факторов. Общая закономерность такова, что с увеличением  $V_c$  давление  $P$  в гидростойках групп секций снижается по всей длине лавы; причем, в

интервале  $V_c = 3,2...7,7$  м/сут. происходит более существенное уменьшение  $P$ , чем в интервале  $V_c = 7,7...11,4$  м/сут., хотя диапазоны указанных интервалов (4,5 м/сут и 3,7 м/сут) не так уж значительно отличаются между собой. Так, в центральной части лавы наблюдается снижение  $P$  до 15-27% в интервале 3,2-7,7 м/сут и всего до 2-4% в интервале 7,7-11,4 м/сут. Но, такое подавляющее превышение градиента изменения  $P$  при относительно малых скоростях  $V_c$  наблюдается не на всех участках по длине лавы: в районе секций №25-60 и №120-150 градиент снижения давления  $P$ , примерно, одинаков на всем интервале  $V_c = 3,2...11,4$  м/сут и составляет 7,0-14,8 Бар на 1 м/сут. увеличения скорости  $V_c$  подвигания лавы.

Стабильная закономерность снижения давления  $P$  при увеличении  $V_c$  все же имеет тенденцию выполаживания с ростом  $V_c$ , то есть, функция  $P(V_c)$  проявляет свойства асимптотического приближения к некоторому постоянному значению при высоких скоростях, что можно наблюдать на графиках рис. 9.4. Однако, для более надежного выявления закономерностей необходимо расширять базу данных за счет постоянного мониторинга параметров работы углевыемочного комплекса. На графиках рис. 9.4 выделено несколько участков по длине лавы (центральная часть и концевые участки), где зависимость  $P_i(V_c)$  разделена для задвинутых к груди забоя секций ( $\delta \leq 0,5$  м) и незадвинутых секций ( $\delta > 0,8$  м). Здесь влияние параметра  $\delta$  имеет место в части несколько разной интенсивности снижения  $P_i$  при росте скорости  $V_c$  – градиент снижения давления у незадвинутых секций заметно выше.

Очевидно, здесь сказывается влияние забоя, сдерживающего опускание породных слоев кровли, которые увеличиваются с ростом расстояния  $\delta$  от груди забоя, а увеличение скорости  $V_c$  не позволяет реализоваться этому опусканию в полной мере, так как секция крепи успевает переместиться на новый участок. Эта закономерность подтверждает концепции существующих представлений о процессах сдвижения надугольной толщи в части развития во времени и пространстве опускания пород кровли и их расслоения при

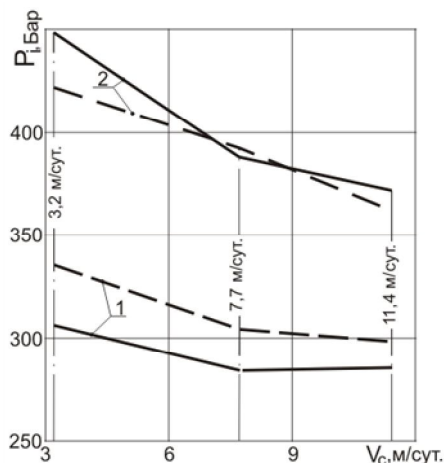


Рис. 9.4. Изменение давления  $P_i$  в гидростойках секций в зависимости от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя: — середина лавы; - - - концевые участки лавы; 1 –  $\delta \leq 0,5$  м; 2 –  $\delta > 0,8$  м

отходе лавы. Действительно, при небольшой разнице (0,3-1,0 м) отставания от груди забоя градиент снижения давления незадвинутых секций составляет 7,3-9,3 Бар на 1 м/сут, а этот же градиент для задвинутых секций снижается до 2,6-4,8 Бар на 1 м/сут, то есть, в среднем в 2,0-2,5 раза. Эту экспериментально установленную закономерность необходимо учитывать при компьютерном моделировании геомеханических процессах сдвигения надугольной толщи, также как и тот факт, что по мере увеличения скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя интенсивность снижения нагрузки на секции падает; если эту закономерность экстраполировать, то, очевидно, существует такое значение  $V_c$ , при которой скорость подвигания очистного забоя уже не влияют на формирование нагрузки на крепь.

В заключение анализа результатов мониторинга давления в гидростойках секций крепи следует оценить степень их нагруженности по отношению к величине несущей способности в соответствии с характеристикой крепи DBT. Для преимущественно задвинутых секций ( $\delta \leq 0,5$  м) давление  $P_i$  колеблется в пределах 58-77% от максимального (давления срабатывания предохранительных клапанов гидростоек); для преимущественно незадвинутых секций ( $\delta > 0,8$  м) давления составляет 78-96% от максимального при достигнутой достаточно стабильной скорости подвигания очистного забоя  $V_c = 7,7$  м/сут. Снижение темпов подвигания лавы приводит к тому, что на отдельных незадвинутых секциях происходит срабатывание предохранительных клапанов, и они переходят в режим податливости, нагружая соседние секции. При среднестабильных (7,7 м/сут) и высоких (11,4 м/сут) скоростях подвигания очистного забоя остается резерв повышения сопротивления крепи, так как среднее давление в гидростойках соответственно составляет 71-80% и 66-75% от максимального.

## 9.2. МОНИТОРИНГ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕКЦИЙ КРЕПИ С ПОРОДАМИ КРОВЛИ ПО ДЛИНЕ ЛАВЫ

Анализ показаний давления  $P_i$  в гидростойках секций механизированной крепи по длине  $Z$  лавы был проведен при различных режимах работы очистного оборудования и меняющегося во времени и пространстве горно-геологической ситуации в окрестности лавы. Задача заключалась в установлении закономерностей изменения давления  $P$  в гидростойках по длине  $Z$  лавы (пропорциональной номеру секции, где произведен съем информации). Для этого собрана обширная база данных, представляющая собой следующую структуру:

– детальный анализ показаний за полные сутки работы очистного комплекса, включающий не менее восьми его положений (в среднем через каждые три часа), что позволяет, помимо прочего, резко ограничить влияние

изменения геомеханических факторов: структуры и свойств надугольной толщи, степени ее обводненности, глубины расположения лавы и тому подобное;

– в течение каждого месяца работы выемочного участка на протяжении квартального этапа еженедельно производился съем информации за полные сутки по вышеприведенной методике; при этом происходило периодическое изменение структуры основной кровли и некоторое стабильное уменьшение глубины расположения лавы в связи с отработкой участка по восстанью пласта; кроме того, изменялись в широком диапазоне технологические параметры работы комплекса (среднесуточная скорость продвижения очистного забоя и продолжительность его остановок) и положение относительно момента посадки основной кровли, когда таковая проявлялась.

При таком подходе к съему показаний давления  $P$  исключена возможность субъективной оценки взаимодействия секций по длине лавы из-за неучета влияния какого-либо существенного фактора. Тем не менее, обработка данных и анализ распределения величин давлений в гидростойках по длине лавы не выявил каких-либо стабильных закономерностей функции  $P(Z)$ , связанных именно с координатой  $Z$  расположения секций крепи вдоль лавы при вариациях геомеханических и технологических параметров ведения очистных работ. Аналогичный результат зафиксирован при ранее проведенных измерениях, где дано обоснование выявленному эффекту отсутствия влияния координаты  $Z$  расположения секции на формирование на нее нагрузки со стороны опускающейся кровли пласта. В дополнение к уже сказанному ранее можно добавить следующее:

– *во-первых*, сдерживающее влияние груди забоя выпуклой формы, безусловно, сказывается как на величине опускания кровли в рабочее пространство лавы, так и на эпюру распределения горного давления по ее длине. Функция  $\sigma_y(Z)$  характеризуется известными областями разгрузки в ее центральной части; но, из-за сдерживающего влияния груди забоя эти перепады эпюры  $\sigma_y(Z)$  имеют многократно меньшую амплитуду, чем в выработанном пространстве. Данный аргумент подлежит обязательному обоснованию при последующем компьютерном моделировании геомеханических процессов в окрестности очистного забоя;

– *во-вторых*, несмотря на влияние груди забоя, опускание непосредственной кровли в рабочее пространство лавы достигает 100-150 мм и более, так, что секции механизированной крепи работают с полной нагрузкой независимо от их положения по координате  $Z$ . Действительно, режим постоянного сопротивления любой гидростойки механизированной крепи спроектирован таким образом, чтобы секция была наделена определенной податливостью (устранить опускания кровли технически невозможно), но при этом ее реакция отпора была близка к максимальной. В процессе податливости происходит выравнивание нагрузки  $Q$  между соседними секциями, что по-



вышает их противодействие горному давлению. Рабочая характеристика гидростоек (связь давлений в поршневой полости с величиной податливости) и секции в целом указывает на резкий рост давления при исчерпании различного рода технических и технологических зазоров, полостей и тому подобное. Обычно, суммарная податливость гидростойки за счет повышения плотности рабочей жидкости в начальный период ее распора, компенсации зазоров и неровностей по контакту перекрытия с кровлей и основания с почвой составляет до нескольких десятков миллиметров, после чего срабатывают предохранительные клапаны и секция переходит в податливый режим, близкий к режиму постоянного сопротивления. Минимальные опускания пород непосредственной кровли в рабочее пространство лавы, как правило, превышают суммарную величину начального «обжатия» секции в жестком режиме ее работы, поэтому, независимо от величины опускания пород непосредственной кровли по длине лавы (эти опускания будут неравномерны с максимумом в центральной части лавы) переход секций в режим податливости с максимальным отпором возможен на любом ее участке. Отсюда возникает явление относительной независимости повышенной реакции отпора секций от их координат  $Z$  расположения при явно выраженной неравномерности опускания кровли по длине лавы. Перепады давления в гидростойках секций крепи связаны с процессом их передвигки в процессе очистной выемки и обусловлены в основном технологическими параметрами; поэтому пониженная реакция отпора (сразу после передвигки) также не связана с координатой  $Z$  положения секции вдоль лавы.

– *в-третьих*, анализ аварийных ситуаций, связанных с посадкой на «жесткую базу» механизированных комплексов, показал, что начало этого процесса не связано с длиной лавы как таковой, а обусловлено другими геомеханическими и технологическими причинами: опорное давление от ранее отработанных выемочных участков, более интенсивный водоприток, изменения структуры кровли пласта, вынужденный простой комплекса, неисправности секции крепи, посадка основной кровли и тому подобное.

В итоге, на основе широкомасштабных наблюдений сделан вывод, что нагрузка на секции механизированной крепи не зависит от координаты их расположения по длине лавы, а определяется геомеханическими и технологическими параметрами, в том числе, и техническим состоянием гидрооборудования каждой секции.

### **9.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ И ШИРИНЫ ЗАХВАТА УГЛЕВЫЕМОЧНОЙ МАШИНЫ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ**

Ранее отмечалось, что ширина захвата струга не поддается тщательному контролю, а опыт отработки 161-й лавы ПСП «Шахта «Степная» рекомендует для обеспечения надежной и бесперебойной работы струга задавать глу-

бину внедрения ножей (резцов) в пределах  $B = 50...70$  мм. Таким образом, ширина захвата струга фиксируется и ее достаточно стабильный и узкий диапазон колебаний не может повлиять на изменение давления  $P$  в гидростойках секции крепи. Тогда для экспериментального изучения остается один параметр – скорость  $V_k$  подачи струга в части выявления закономерности влияния  $V_k$  на формирование нагрузки на крепь через показания давления в ее гидростойках. Однако, выявление зависимости  $P(V_k)$  принципиально возможно лишь при обеспечении вариации скорости  $V_k$  движения струга в процессе отделения угля от массива. В наших же условиях по технической характеристике струга, он обладает только двумя фиксированными скоростями подачи (0,66 и 0,92 м/с) без возможности их плавного регулирования как у углевыемочных комбайнов; к тому же на протяжении практически всего периода отработки 161-й лавы была использована только одна – первая скорость подачи, а ее усредненное значение (с учетом остановок) за какой-либо период времени не позволяет объективно оценить влияние  $V_k$  на волну напряжений в зоне работы струга. Следовательно, оба исследуемых параметра  $B$  и  $V_k$  имеют фиксированные значения и не позволяют экспериментально выявить закономерности их влияния на величину давления  $P$  в гидростойках секции крепи. Здесь следует использовать второе направление исследований – компьютерное моделирование процессов отработки 161-й лавы.

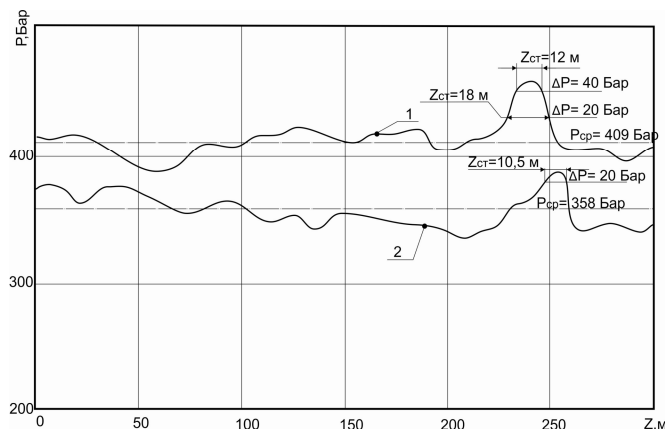
Тем не менее, мы имеем возможность экспериментально проследить сам факт образования волны напряжений (аномальной области) в массиве в зоне работы струга и оценить ее параметры при фиксированных значениях  $B$  и  $V_k$ , но переменных других параметрах, а именно: структуре  $C$  пород кровли, скорости  $V$  подвигания очистного забоя, положении  $\delta$  секции относительно груди забоя.

Методология выявления волны напряжений построена следующим образом. На первом этапе анализируется влияние положения струга при разных: структуре кровли, скорости подвигания  $V$  очистного забоя и положения  $\delta$  секции. При этом сравниваются графики  $P(Z)$  изменения давления по длине  $Z$  лавы с таковыми в районе движения струга с задачей установления степени аномалии горного давления по аналогии с существующими исследованиями [91, 102, 104, 114, 121] волны напряжений при работе углевыемочных комбайнов. Показания давлений в гидростойках секций усредняются (при фиксированных параметрах  $C$ ,  $V$  и  $\delta$ ) по двум вариантам: по длине лавы за исключением зоны работы струга; по близлежащим участкам лавы длиной 15-20 м с обеих сторон от зоны работы струга для уменьшения влияния изменения структуры кровли по длине лавы. На втором этапе, в случае обнаружения сколь-нибудь существенного возмущения давления  $P$  в зоне работы струга, ставится задача выявления закономерности влияния скорости  $V$  подвигания

лавы на параметры аномалий горного давления: величина  $\Delta P$  среднего отклонения давления от общего среднего значения и ширины  $Z_{cm}$  участка лавы, где проявляется влияние струга. Очевидно, что по длине лавы  $Z_{cm}$  аномалии давления  $P_{cm}$  также необходимо усреднить по крайним значениям  $\delta$  положения секций крепи относительно груди забоя. Тогда во взаимосвязанных параметрах  $P_{cm}$  и  $Z_{cm}$  имеет место тенденция: чем больше секций будем вовлекать в участок  $Z_{cm}$  длины лавы, тем меньше будет отклонение  $\Delta P$ , равное разнице между средним давлением  $P_{cm}$  в районе струга и средним давлением  $P_{cp}$  по лаве (или ее части). Здесь принято решение включать в зону влияния струга лишь те группы секций (или отдельные секции), где отклонение  $\Delta P$  будет превышать не менее, чем на 40 Бар величину  $P_{cp}$ , то есть, примерно, на 10% выше среднестатистических показаний давления за длительный период измерений; при дальнейших исследованиях величина учитываемого отклонения  $\Delta P$  может корректироваться.

По описанной методологии на первом этапе анализ параметров волны напряжений и степень ее значимости дал следующие результаты. Выявить волну напряжений в зоне работы стругового исполнительного органа оказалось весьма затруднительным по двум причинам: слабое влияние на давление  $P$  изменения НДС кровли лавы при ширине захвата струга  $B = 50...70$  мм и скорости подачи  $V_k \approx 40$  м/мин с одной стороны и колебания давления в гидростойках по длине лавы, обусловленные другими факторами, с другой стороны. Данная ситуация стабильно повторялась на всех исследуемых участках при вариации геомеханических параметров, но имеется одно исключение. При средне – и крупнослоистой структуре основной кровли (участки №1, №3 и №5, см. рис. 10.1) в период времени, предшествующий ее посадке, все же проявляется волна напряжений в зоне работы стругового исполнительного органа. На рис. 9.5 показаны графики изменения давления  $P(Z)$  по длине  $Z$  лавы на участке №5 перед посадкой основной кровли; эпюра  $P(Z)$  разделена на две крайние группы по положению  $\delta$  секций относительно груди забоя и усреднена по группам из 3-4 соседних секций. При таком подходе достаточно четко можно оценить параметры  $\Delta P$  и  $Z_{cm}$  волны напряжений в зоне работы стругового исполнительного органа, которая в большей степени проявляется для секций, удаленных от груди забоя, где растут опускания кровли. Здесь при средней (по длине лавы) величине давления  $P_{cp} = 409$  Бар, то есть  $\Delta P = 48$  Бар. Участок превышения давления  $\Delta P = 40$  Бар распространяется на длину  $Z_{cm} = 12$  м, а при  $\Delta P = 20$  Бар  $Z_{cm} = 18$  м, что характеризует затухание волны напряжений. Для секций, придвинутых к груди забоя (график 2 на рис. 9.5), среднее по лаве давление равно  $P_{cp} = 358$  Бар, а максимум  $P = 386$  Бар имеет, примерно, ту

же координату  $Z$  расположения, что и для незадвинутых секций. Как видим, превышение давления  $\Delta P = 28$  Бар снижается, что вполне объяснимо влиянием забоя, сдерживающего опускания кровли. Так что здесь можно оценить только длину участка превышения давления  $\Delta P = 20$  Бар, которая составляет  $Z_{cm} = 10,5$  м и существенно меньше, чем для незадвинутых секций по вышеуказанным причинам.



**Рис. 9.5. Изменение давления в зоне работы стругового исполнительного органа на участке №5 длины выемочного столба перед посадкой основной кровли:**  
1 —  $\delta \leq 0,5$ ; 2 —  $\delta > 0,8$

В результате анализа можно сделать следующие выводы:

- при высокой скорости подачи и малой ширине захвата стругового исполнительного органа волна напряжений в зоне его работы существенно сказывается на изменении давления в гидростойках, а, значит и на увеличении нагрузки на секции крепи; этот факт стабильно проявляется в широком диапазоне изменения геомеханических и технологических факторов;

- исключение составляют недоминирующие условия периода посадки основной кровли, представленной средне- и крупнослоистой структурой; здесь зафиксировано превышение давления до 10-12% на коротком участке длиной до 12 м (до 8 секций) и только у незадвинутых к груди забоя секций. В итоге можно утверждать, что конструктивно-технологические параметры работы струга обеспечивают стабильность проявлений горного давления без возникновения сколь-нибудь существенных его аномалий в зоне работы исполнительного органа. Влияние скорости подачи и ширины захвата углевыемочной машины, как и других параметров в широком диапазоне их изменения наиболее целесообразно исследовать численными методами компьютерного моделирования, а зачастую вычислительный эксперимент является единственным средством анализа геомеханических процессов с точки зрения обоснованного и достоверного разделения влияния отдельных параметров на развитие нагрузки на механизированную крепь.

## 10. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАГРУЖЕНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

### 10.1. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

В соответствии с изложенной выше методологией съема данных давления в гидростойках секций крепи было отобрано пять участков по длине выемочного столба, которые наиболее подходят для выявления закономерностей влияния структуры пород кровли и глубины  $H$  расположения лавы на формирование нагрузки на механизированную крепь. С точки зрения выявления раздельного влияния структуры кровли подобраны четыре участка, которые попарно расположены недалеко друг от друга (исключение влияния  $H$ ), но обладают существенно различной структурой основной кровли вплоть до пласта  $C_6^1$ . Данная мощность основной кровли по результатам предварительного моделирования ее сдвижения вносит основной вклад в формирование нагрузки на механизированную крепь. Для наглядности и подтверждения реализации вышеупомянутых методических положений все пять структур приведены на рис. 10.1, из которых видна, примерно, постоянная мощность исследуемой основной кровли, заключенная между пластами  $C_6$  и  $C_6^1$ . Выявление степени влияния структуры основной кровли (механические характеристики слагающих слоев практически идентичны) осуществляется попарным сравнением показаний давления  $P$  в гидростойках для участков №1, №2 и для участков №4, №5: участки №1 и №5 характеризуются более мощными слоями (средне – и крупнослоистая структура), а сравниваемые близлежащие участки №2 и №4 сложены в основном менее мощными слоями (большей частью средне – и иногда тонкослоистая структура). Определение степени влияния глубины  $H$  расположения лавы производится на трех участках – №1, №3 и №5, где структуры основной кровли характеризуются как средне – и крупнослоистая с залеганием одних и тех же литологических разностей с, примерно, одинаковыми механическими свойствами. Так же следует напомнить, что съем показаний на выделенных участках производился не менее 8 раз в сутки при достаточно постоянной ( $\pm 10\%$ ) среднесуточной скорости подвигания очистного забоя.

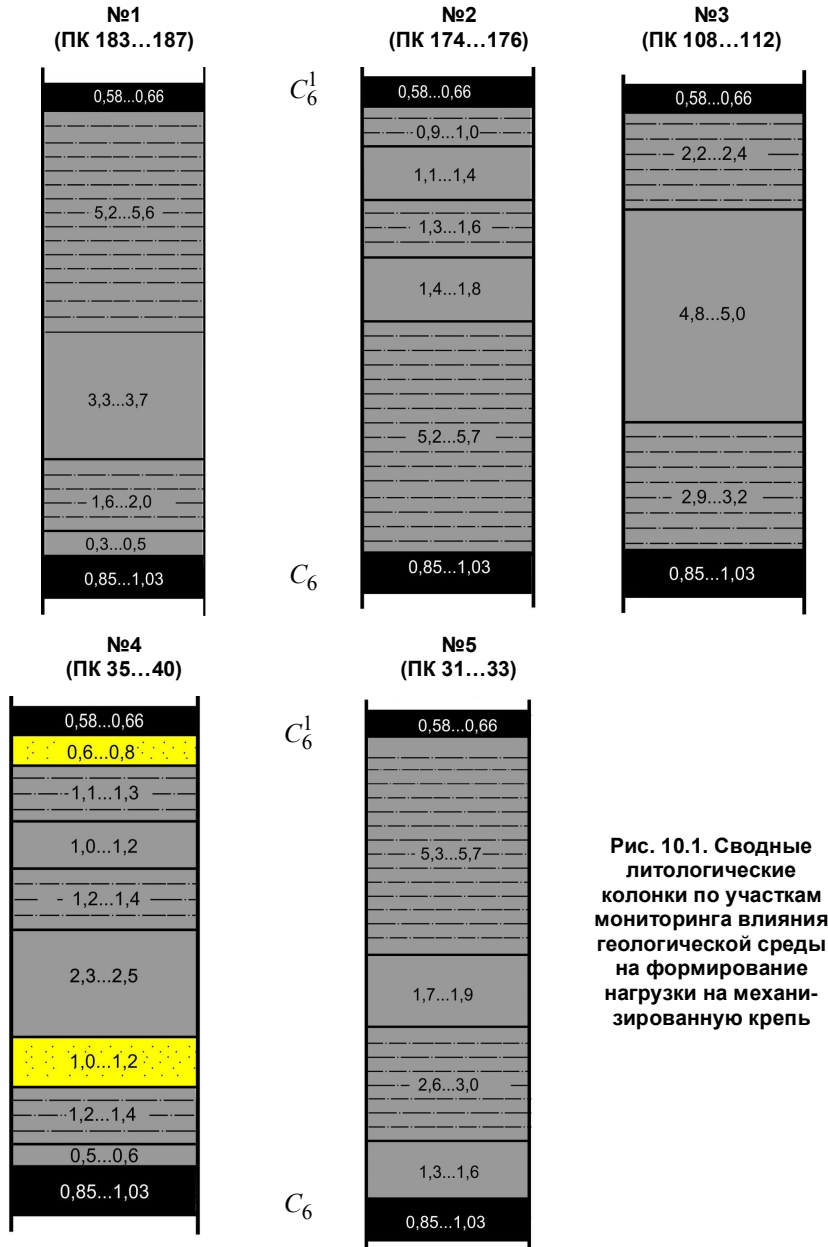


Рис. 10.1. Сводные литологические колонки по участкам мониторинга влияния геологической среды на формирование нагрузки на механизированную крепь

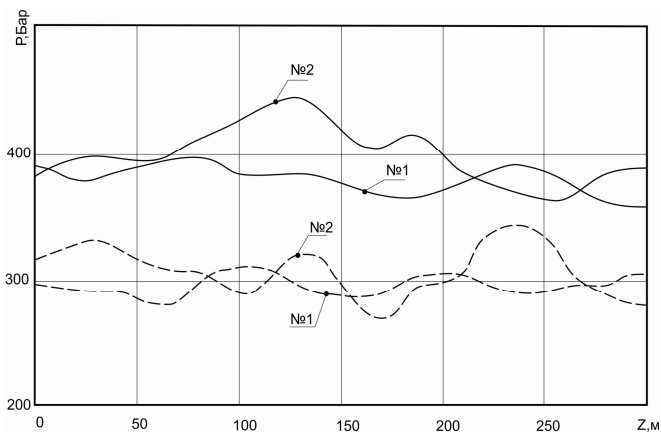


Рис. 10.2. Изменение давления  $P$  в гидростойках групп секций по длине  $Z$  лавы в процессе отработки участков №1 и №2:  
—  $\delta \leq 0,5$  м;  
- - -  $\delta > 0,8$  м

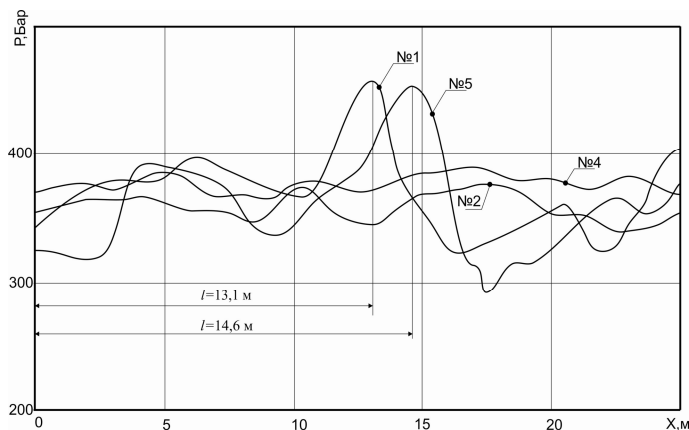
Показания давления  $P$  в гидростойках секций крепи существенно изменяются вдоль лавы (см. рис. 9.1) с отсутствием какой-либо стабильной закономерности. По этой причине было предложено (см. рис. 9.2) усреднить показания  $P$  по группам из 12-15 секций вдоль лавы, — тогда амплитуда колебаний  $P(Z)$  значительно сокращается, но все же они позволяют учитывать изменения процесса опускания кровли вдоль лавы, которые не в последнюю очередь связаны с изменениями структуры основной кровли. Несмотря на то, что отсутствует техническая возможность учитывать вариацию структуры основной кровли по длине лавы, считаем целесообразным дать графики изменения  $P(Z)$  по группам секций во избежание чрезмерного усреднения давления и создания ситуации, когда отследить влияние структуры основной кровли уже не представляется возможным. Анализ показаний  $P(Z)$  для первой пары участков №1 и №2 выполнен по графикам на рис. 9.2 при глубине расположения лавы  $H = 429...437$  м. Здесь, чтобы исключить влияние положения секций относительно груди забоя по параметру  $\delta$  (см. рис. 9.2) графики построены для двух крайних значений  $\delta \leq 0,5$  м и  $\delta > 0,8$  м; поэтому для каждой из двух структур на рис. 10.2 приведено по два графика  $P(Z)$ . Анализируя влияние разной структуры основной кровли, отметим его не очень заметное проявление. Для секций, придвинутых к груди забоя, среднее давление  $P_{cp}$  по длине лавы в структуре №1 ниже, чем в структуре №2 всего на 3,7%, в то время как разница в строении основной кровли на участках №1 и №2 весьма существенна (см. рис. 10.1). Величина максимума  $P_{max}$  для структуры №2 превышает таковую для структуры №1 на 10,6%, но и минимум  $P_{min}$  оказался ниже на 3,9% также для структуры №2. Приведенные данные свидетельствуют о том, что в районе груди забоя разница в строении основной кровли на высоту порядка 10 м не оказывает существенного влияния (для струговой лавы) на формирование нагрузки на крепь. Теперь

проанализируем распределение давления  $P$  в гидростойках секций, удаленных от груди забоя не менее, чем на 0,8 м (см. рис. 10.2, сплошные линии). Здесь наблюдается ситуация, схожая с предыдущей: среднее отклонение давления по длине лавы выше на 5,6% для более компактной структуры №2; для нее же максимум  $P_{max}$  выше на 11,3%, а минимум  $P_{min}$  практически одинаков со структурой №1.

Таким образом, наблюдается некоторое увеличение нагрузки на секции механизированной крепи для более слоистой структуры №2 (где основная кровля сложена аргиллитом и алевролитом мощностью 1,0-1,5 м), относительно небольшая мощность слоев предопределяет их более интенсивное опускание на крепь, а высота контура формирования нагрузки распространяется несколько выше в кровлю. Тем не менее, разница в показаниях давления не столь существенна, как разница в структуре основной кровли. Для подтверждения этого факта был проведен аналогичный сравнительный анализ показаний давления в гидростойках секций на участках №4 и №5, расположенных на глубине  $H = 342...350$  м; результаты подтвердили мало-значительное влияние структуры основной кровли на формирование нагрузки на крепь.

В процессе проведения вышеуказанных исследований была отмечена некоторая особенность изменения давления  $P$  по координате  $X = 20...25$  м длины выемочного участка во взаимосвязи с проявлениями воздействия шага  $l$  обрушения основной кровли (рис. 10.3). При описании механизма взаимодействия пород кровли с механизированной крепью было отмечено, что в преимущественно тонко- и среднеслоистых слабых породах кровли не происходит зависания сколь-нибудь значительных по протяженности породных консолей, поэтому проявления посадки основной кровли малозаметны. Действительно, если мы проследим изменение давления  $P$  в гидростойках групп секций (анализировалась группа рядом расположенных секций в количестве 15 шт., поэтому показания  $P$  усреднялись по параметру  $\delta$ ) по длине  $X$  обрабатываемого участка, то отметим достаточное постоянство функции  $P(X)$  для тонко- и среднеслоистых структур №2 и №4. Максимальная амплитуда колебаний составляет 10,1% для участка №2 и 6,6% для участка №4 при длине съема показаний  $X = 25$  м, так что можно утверждать о практическом отсутствии явления посадки основной кровли как такового в условиях исследуемых структур №2 и №4. При анализе колебаний  $P(X)$  в пределах выявленного диапазона амплитуд можно отметить некоторую периодичность этого процесса с длиной периода 6-7 м; сравнивая эту величину с длиной секции крепи плюс ее расстояние до груди забоя 5-6 м в сумме), можно утверждать, что обрушение основной кровли (и предшествующий этому рост нагрузки) происходит сразу же за секцией, что подтверждает разработанную нами схему сдвижения пород надугольной толщи в условиях шахт Западного Донбасса.





**Рис. 10.3. Изменение давления  $P$  в гидростойках групп секций в процессе отработки участков №№1, 2, 4, 5 с соответствующей структурой основной кровли**

Тем не менее, в средне- и крупнослоистых структурах основной кровли №1 и №5 наблюдаются возмущения нагрузки на секции, которые тождественны всплеску функции  $P(X)$  давления по мере отработки исследуемых участков. Эту «аномалию» мы связали с шагом  $l$  посадки основной кровли, представленной (помимо прочих слоев) относительно крепким алевролитом (коэффициент крепости до 4) практически одинаковой мощности от 5,2 м до 5,7 м для обоих участков. Данные характеристики алевролита позволяют прогнозировать зависание довольно протяженной консоли, чему также способствует его размещение в верхней части основной кровли, когда выше алевролита уже не прогнозируется существенного объема обрушающихся пород и удлиненная породная консоль может находиться в устойчивом состоянии. Поэтому, интенсивный рост давления  $P$  в гидростойках секций объясняется увеличением длины зависающей консоли мощного алевролита в период, предшествующий его обрушению, то есть, перед посадкой основной кровли. Здесь на участке  $X = 3...5$  м перед обрушением породная консоль, все более деформируясь, практически полностью опускается на нижележащие породы и через них передает нагрузку на механизированную крепь. Таким образом, совместное действие фактора увеличения длины консоли (при подвигании очистного забоя) и фактора непрерывного ее опускания с пригрузкой нижележащих пород приводит к резкому повышению давления в поршневых полостях гидростоек, которое даже при усреднении показаний достигает величины  $P = 450...460$  Бар срабатывания предохранительных клапанов гидростоек – крепь работает с максимальной нагрузкой. Сам по себе переход гидростоек в режим податливости не вызывает осложнений, если обеспечена достаточная раздвижность гидростоек; в противном случае грозит опасность посадки секций на «жесткую базу» со всеми вытекающими последствиями.

После достижения максимума  $P(X)$  по окончании посадки основной кровли давление резко снижается и при последующем подвигании забоя до

3 м достигает минимума  $P_{min}(X)$ , величина которого до 25 % меньше, чем  $P_{min}(X)$  на участках №2 и №4 основной кровли повышенной слоистости. Это обусловлено тем, что после обрушения породная консоль мощного алевролита имеет небольшой вылет, находится в весьма устойчивом состоянии с малой величиной прогиба и вносит небольшой вклад в формирование нагрузки на крепь – последняя разгружается. При дальнейшем подвигании забоя происходит постепенный рост давления, и цикл повторяется; но из-за ограничений протяженности участков структур №1 и №5 проследить стабильность цикла нагружений секций не представляется возможным. Здесь же следует отметить следующее:

- зафиксированный шаг обрушения основной кровли составил  $l = 13,1$  м для структур участка №1 ( $H = 434...437$  м) и  $l = 14,6$  м для структуры участка №5 ( $H = 342...345$  м);

- при существенном изменении глубины  $H$  расположения лавы разница в шаге обрушения составила 11,5%, но имеющийся рост  $l$  указывает на небольшое влияние глубины разработки в части снижения воздействия вертикального горного давления  $\sigma_y = \gamma H$  на консоль из мощного алевролита, которая за счет прогиба «уходит» от повышенных нагрузок;

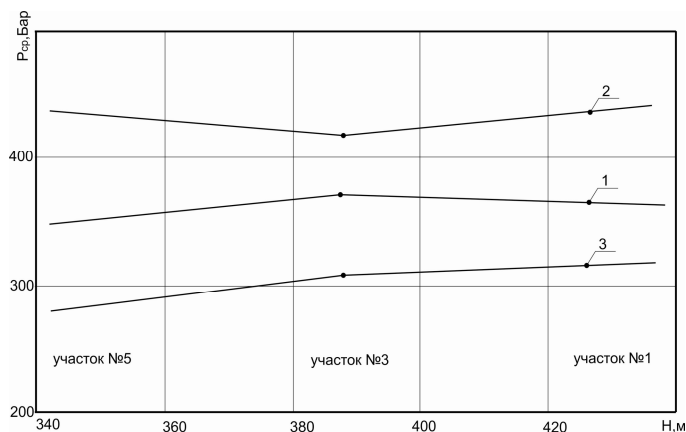
- изученные участки №1 и №5 реже встречаются в структуре надугольной толщи, но они требуют повышенного внимания при прохождении лавой: развития стабильно высокой скорости подвигания очистного забоя и не допущения его длительных остановок;

- зафиксированные особенности изменения давления  $P(X)$  в процессе отработки выемочного столба вполне согласуются с положениями разработанного механизма взаимодействия надугольной толщи с механизированной крепью и указывают на неоднозначность связи структуры основной кровли с процессом формирования нагрузки на крепь; это усиливает роль моделирования геомеханических процессов, как инструмента для установления данных закономерностей.

## 10.2. ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

Неоднозначность влияния структуры основной кровли накладывается на неоднозначность влияния глубины  $H$  размещения лавы, которая частично отмечена ранее для горно-геологической ситуации образования в основной кровле мощных породных консолей. Если обратиться к рис. 10.3, то при сравнении средних показаний давления  $P$  на участках №1 и №5 до и после посадки основной кровли установлено их различие всего до 6% при уменьшении глубины  $H$  до 27%. Для тонко- и среднеслоистой структуры №2 и №4 вообще наблюдается «алогичная» тенденция роста среднего давления  $P$

(по длине участков) до 4,5% при снижении глубины размещения лавы до 22%. Очевидно, это связано с имеющимися отличиями структур кровли: размещение в непосредственной кровле участка №2 алевролита мощностью 5,2-5,7 м; размещение в основной кровле участка №4 двух слоев песчаника, хоть и небольшой мощности (до 1,2 м), но способных к образованию консолей увеличенной длины.



**Рис. 10.4.** Изменение среднего давления  $P_{cp}$  в гидростойках в зависимости от глубины  $H$  ведения очистных работ при положении  $X$  лавы относительно шага  $I$  посадки основной кровли, представленной средне- и крупнослоистой структурой: 1 –  $X < I$ ; 2 –  $X = I$ ; 3 –  $X > I$

С целью уточнения наличия (или отсутствия) связи  $P$  и  $H$ , а также ее значимости (в данных горно-геологических и горнотехнических условиях) был проведен анализ влияния глубины размещения лавы с привлечением участка №3 (см. рис. 10.1), расположенного на глубине  $H = 385...386$  м и имеющего средне- и крупнослоистую структуру для достоверного сравнения с показателями  $P$  на участках №1 и №5. По результатам съема данных и их усреднения по длине лавы и положения  $\delta$  секции относительно груди забоя построены графики (рис. 10.4) для различных положений  $X$  очистного забоя по длине выемочного участка. Графическое отображение тенденций связи давления  $P$  в гидростойках с глубиной разработки еще раз подчеркивает их неоднозначность:

– положение лавы до посадки основной кровли ( $X < I$ ) характеризуется некоторой стабильностью давления в гидростойках с последующим его нарастанием в период, предшествующий посадке (см. рис. 10.3); это положение отражает линия 1 на рис. 10.4, где на участке №3 ( $H = 385...386$  м) наблюдается рост среднего давления  $P_{cp}$  на 77% по сравнению с участком №5 ( $H = 342...345$  м); однако при дальнейшем росте глубины расположения лавы (участок №1,  $H = 434...437$  м) давление  $P_{cp}$  снижается на 3,0%, а в целом при увеличении  $H$  на 92 м  $P_{cp}$  растет всего на 4,6%, в то время как относительное возрастание глубины ведения очистных работ составляет 26,7%;

– в момент посадки верхних слоев основной кровли ( $X = l$ ) закономерность  $P_{cp}$  от  $H$  также практически не прослеживается: на участке №3 наблюдается снижение среднего давления на 4,2% (линия 2) по сравнению с участком №5; дальнейший рост глубины  $H$  показал, что на участке №1 давление  $P_{cp}$  увеличивается на 5,8% по сравнению с участком №3, а в целом разница между этими показателями на участках №1 и №5 составила 1,4%;

– после посадки основной кровли ( $X > l$ , линия 3) наблюдается стабильный рост среднего давления  $P_{cp}$  с увеличением глубины разработки  $H$ , однако градиент этого роста достаточно низкий, так что разница  $P_{cp}$  между участками №1 и №5 составляет 10,5%.

Из приведенного анализа можно сделать основной вывод о незначительном влиянии глубины разработки  $H$  на формирование нагрузки на крепь стругового очистного комплекса в исследуемых горно-геологических и горно-технических условиях. Объяснение этому факту лежит в плоскости механизма послойного опускания надугольной толщи (см. рис. 6.4), когда нагрузка на крепь определяется объемом пород внутри контура свода над крепью, а не весом всей надугольной толщи, и здесь влияние  $H$  на размеры свода не столь существенно как других параметров ведения очистных работ.

### 10.3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ШАГА ПОСАДКИ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ НА НАГРУЖЕНИЕ КРЕПИ

Основное внимание уделено участкам со средне- и крупнослоистой структурой основной кровли, так как значительный объем исследований по тонко- и среднеслоистой структуре был выполнен ранее. Информация в процессе съема показаний была обобщена по всем трем участкам (№1, №3 и №5) со средне- и крупнослоистой структурой (см. рис. 10.1), в результате чего был набран достаточно представительный интервал изменения среднесуточной скорости продвижения  $V_c$  от 2,6 м/сут до 10,8 м/сут. Также на графиках рис. 10.5 произведе-

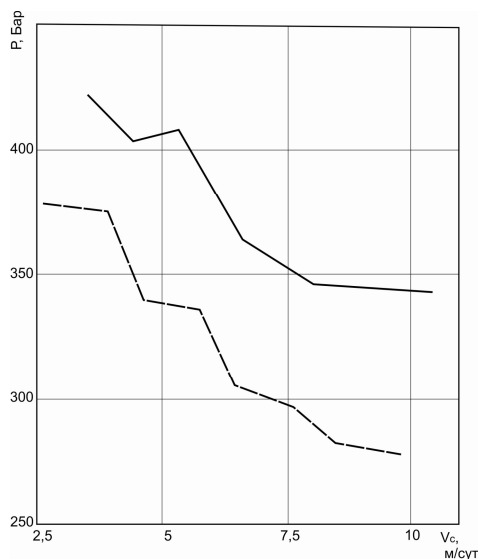
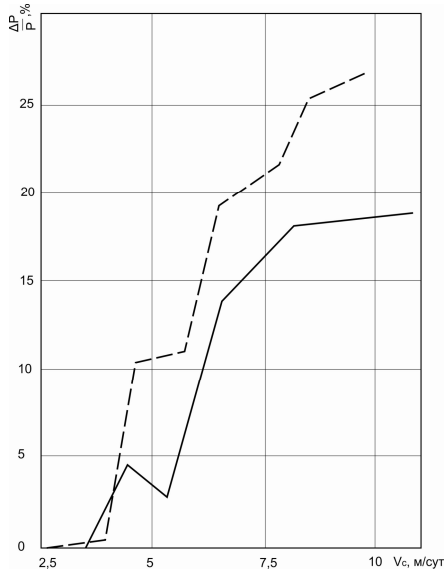


Рис. 10.5. Изменение давления  $P$  в гидростойках соседних секций в зависимости от скорости  $V_c$  продвижения очистного забоя на участках со средне- и крупнослоистой структурой основной кровли: — перед ее посадкой; - - - на остальной длине шага посадки

дено разделение закономерности  $P(V_c)$  на две группы участков: непосредственно перед посадкой основной кровли и на остальной части длины шага



**Рис. 10.6. Относительное снижение давления  $\Delta P/P$  в гидростойках секций при росте скорости  $V_c$  продвижения очистного забоя:**  
 — перед посадкой основной кровли; - - - на остальной длине шага посадки

посадки кровли со средне- и крупно-слоистой структурой. Как видим, обе закономерности имеют тенденцию к снижению давления  $P$  в гидростойках при увеличении скорости  $V_c$  продвижения очистного забоя. Так, на участках перед посадкой основной кровли усредненное давление в гидростойках снижается до 19% в интервале роста  $V_c = 3,5...10,8$  м/сут; на остальной длине участков отмечается снижение нагрузки на секции (как эквивалент давления  $P$  в гидростойках) до 27% в интервале увеличения  $V_c = 2,6...9,7$  м/сут (рис. 10.6). Полученные данные хорошо коррелируют с ранее установленными тенденциями изменения  $P(V_c)$  для средне- и тонкослоистой кровли, так как механизм образования этой закономерности един и обусловлен «запаздыванием» во времени опускания породных слоев на механизированную крепь при высоких скоростях подачи, где немаловажную роль играет сдерживающее влияние груди забоя. Отличие заключается в формировании по-

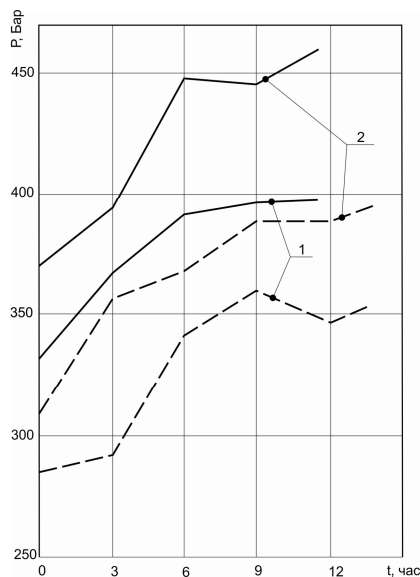
вышенной до 13-24% нагрузки в период, предшествующий посадке средне- и крупнослоистой основной кровли. Но, обращает внимание регулярно проявляющийся факт снижения степени влияния  $V_c$  на величину нагрузки на крепь, начиная от скорости продвижения очистного забоя  $V_c \geq 8,0...8,5$  м/сут.; следовательно, наиболее благоприятный режим работы механизированного комплекса (с точки зрения снижения нагрузки на крепь) возникает в исследуемых горно-геологических условиях при скорости продвижения очистного забоя не менее 8 м/сут.

#### 10.4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОСТАНОВОК ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Установлено, что наибольшее влияние на рост давления  $P(t)$  во время простоя оказывают (помимо геомеханических факторов) положение  $\delta$  секции относительно груди забоя и скорость  $V_c$  его подвигания. При средне- и тонкослоистой структуре основной кровли тенденции влияния указанных факторов были отмечены и проанализированы ранее. На данном этапе выполнена оценка процесса нарастания нагрузки на крепь со стороны средне- и крупнослоистой кровли, особенно в период ее посадки, который наряду с остановкой забоя составляет главную опасность посадки механизированной крепи на «жесткую базу».

На рис. 10.7 представлено семейство графиков нарастания усредненного давления  $P$  в гидростойках во времени  $t$  простоя лавы, которые разделены по двум параметрам: расстояние  $\delta$  секции относительно груди забоя и положение забоя относительно шага посадки основной кровли (непосредственно перед посадкой и на остальной длине шага посадки основной кровли). Здесь, как и ранее, собрана информация по показаниям давления со всех участков (№1, №3 и №5) со средне- и крупнослоистой структурой основной кровли. Общая тенденция такова, что функции  $P(t)$  возрастают с увеличением времени  $t$  простоя: наиболее существенно – в первые 6 часов остановки забоя, затем интенсивность роста давления (эквивалентной нагрузки) падает. С точки зрения скорости нарастания и величины давления  $P$  наибольший рост нагрузки наблюдается для незадвинутых секций в период, предшествующий посадке основной кровли. В этот период относительная разница между  $P$  для задвинутых ( $\delta < 0,5$  м) и незадвинутых

( $\delta > 0,8$  м) секций возрастает от 8,0-12,1% при  $t \leq 3$  час до 12,8-15,3% при  $t \geq 9$  час, что объясняется более интенсивным прогибом слоев кровли на некотором расстоянии от груди забоя и повышенной скоростью этого проги-



**Рис. 10.7. Нарастание давления  $P$  в гидростойках задвинутых (1) и не задвинутых (2) секций во времени  $t$  простоя забоя:**  
— перед посадкой основной кровли; - - - на остальной длине шага посадки

ба (под действием реологических факторов) из-за снижения сдерживающего влияния груди забоя. Также во времени  $t$  увеличивается относительная разница в величине давления, обусловленная посадкой основной кровли по сравнению с остальной длиной участка для незадвинутых секций: она изменяется от 12,7% при  $t \leq 3$  час до 15,2-18,8% при  $t \geq 9$  час, что обусловлено более интенсивным опусканием протяженных породных консолей и развитием этого процесса во времени вплоть до момента их обрушения.

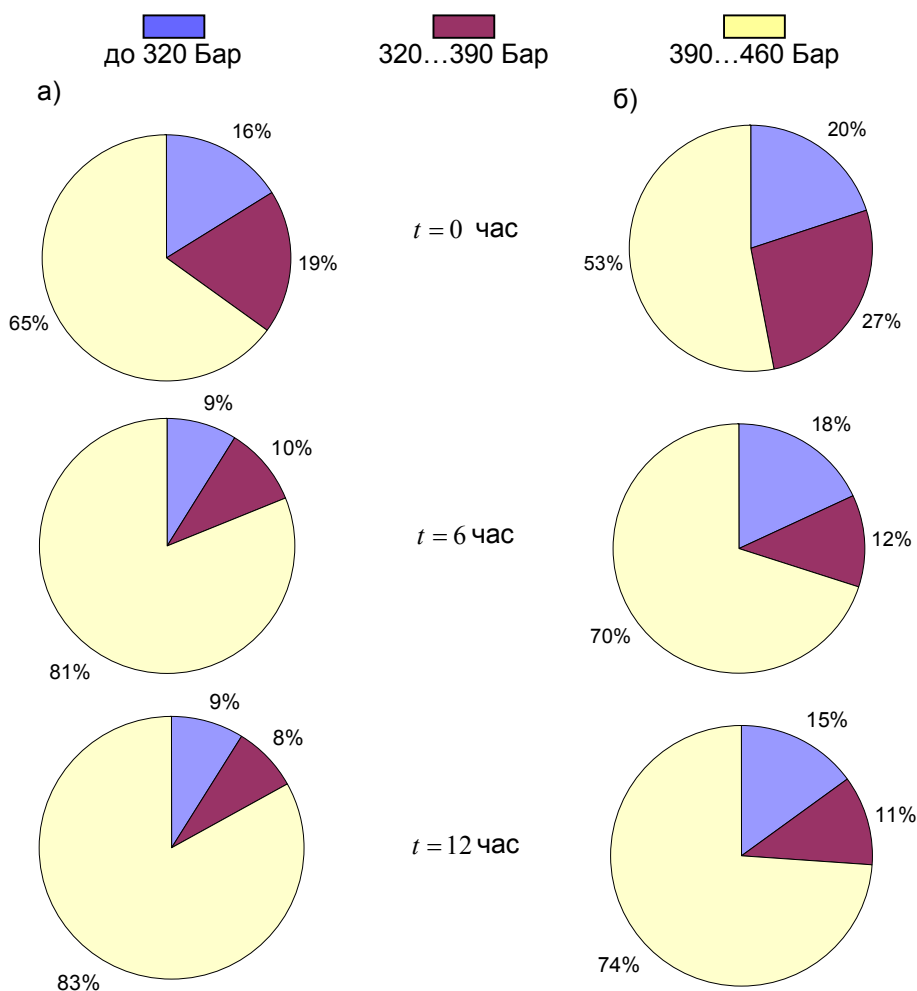


Рис. 10.8. Диаграмма нарастания давления  $P$  в гидростойках во времени  $t$  простоя лавы при двух положениях ее остановки: а) перед посадкой основной кровли; б) на остальной длине шага посадки

Среди задвинутых секций, где велико сдерживающее влияние груди забоя, относительная разница нарастания давления  $P$  во времени  $t$  простоя достаточно стабильна: от 8,4-26,0% при  $t \leq 3$  час до 10,9-14,7% при  $t \geq 9$  час.

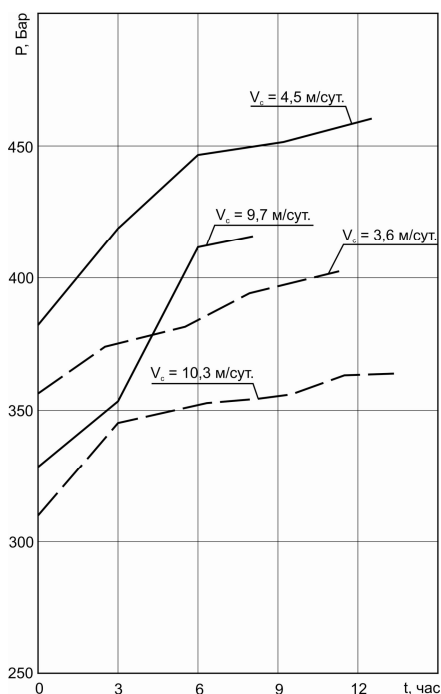
Приведенные закономерности оперируют усредненным значением давления  $P$  в гидростойках секций при их различном положении  $\delta$  относительно груди забоя. Но, представляет также интерес статистические сведения относительно распределения  $P$  по длине лавы для двух случаев ее остановки: непосредственно перед посадкой основной кровли и на остальной длине шага посадки. Подтверждается тенденция более интенсивного роста давления в первые 6 часов простоя лавы; для более наглядной иллюстрации этого вывода на рис. 10.8 приведены диаграммы процентного соотношения количества секций, находящихся в разной степени нагружения при трех моментах времени, прошедшем после остановки забоя:  $t = 0$  час,  $t = 6$  час и  $t = 12$  час. Деление секций на три группы выполнено по величине давления в гидростойках и его отношению к максимальной реакции отпора (несущей способности секций в момент срабатывания предохранительных клапанов гидростоек):

- первая группа –  $P < 320$  Бар (<70% от максимальной реакции отпора);
- вторая группа –  $P = 320...390$  Бар (70-85%);
- третья группа –  $P > 390$  Бар (>85%).

Как видим, с увеличением продолжительности  $t$  простоя механизированного комплекса снижается процентное отношение недогруженных секций и увеличивается доля секций, нагруженных свыше 85% от своей максимальной реакции отпора. Обращает внимание высокий процент секций, работающих с реакцией, приближающейся к максимальной при остановке забоя не менее 6 часов в период, предшествующий посадке основной кровли, представленной средне- и крупнослоистой структурой. В этой ситуации при более длительном простое можно ожидать массового перехода секций в податливый режим работы с уменьшением высоты рабочего пространства лавы. Такой вариант развития событий, несмотря на его низкую вероятность, представляет наибольшую опасность в плане возможной посадки комплекса на «жесткую базу». При прохождении лавой данных участков необходимо учитывать возможную опасность и предусматривать мероприятия по безаварийной работе комплекса, основным из которых является поддержание на определенном уровне стабильной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя, предшествующей его остановке, на процесс нарастания давления  $P$  в гидростойках (рис. 10.9) как непосредственно перед посадкой основной кровли, так и на остальном участке по длине шага посадки. В результате установлено, что в обеих ситуациях скорость  $V_c$  существенно влияет на процесс нарастания давления  $P$  во времени  $t$  простоя. Так, непосредственно перед посадкой основной кровли снижение давления  $P$  (при  $V_c = 4,5$  м/сут) составило 16,1-18,7% в первые три часа простоя и порядка



8,5% при  $t \geq 6$  час. Как видим, наблюдается тенденция уменьшения влияния  $V_c$  с ростом продолжительности  $t$  простоя, что объясняется воздействием реологических факторов, которые с течением времени частично нивелируют снижение объема пород, формирующих нагрузку на крепь, достигнутое за счет высокой скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя. Эта тенденция наи-



**Рис. 10.9.** Изменение давления  $P$  в гидростойках групп секций в зависимости от времени  $t$  простоя очистного забоя в средне- и крупнослоистой структуре основной кровли: — на участке перед ее посадкой; - - - на остальном участке

более ярко проявляется именно при за-  
висании протяженных породных консо-  
лей перед посадкой основной кровли со  
средне – и крупнослоистой структурой.  
На остальной длине шага посадки ос-  
новной кровли рассматриваемой струк-  
туры влияние скорости  $V_c$  подвигания  
очистного забоя несколько меняется.  
При сравнении двух скоростей подвига-  
ния очистного забоя (3,6 м/сут и 10,3  
м/сут) выравнивается степень влияния  
 $V_c$  в процессе остановки забоя: за пер-  
вые три часа простоя это влияние со-  
ставило 9,0-14,8%, а после 9 часов про-  
стоя – 11,4-11,7%. Данный факт также  
обусловлен развитием процесса опу-  
скания породных консолей на крепь и при  
их относительно небольшой длине со-  
кращение нагрузки (за счет повышенной  
 $V_c$ ) компенсируется увеличением на-  
грузки во времени  $t$  простоя, что под-  
тверждает основные принципы разрабо-  
танного нами механизма формирования  
нагрузки на механизированную крепь.

Общий вывод из результатов данной  
части исследований таков, что наиболее  
опасной ситуацией является продолжи-  
тельная остановка лавы непосредст-  
венно перед посадкой основной кровли  
со средне- и крупнослоистой структурой  
и рекомендуется эти участки проходить

с повышенной скоростью  $V_c$  подвигания очистного забоя для обеспечения  
запаса реакции отпора крепи в случае вынужденных простоев.

## ВЫВОДЫ

По результатам данного этапа мониторинга режимов работы углевыемочного оборудования струговой лавы сформулированы следующие выводы:

- информация, поступающая от системы управления рабочими процессами в лаве, требует ее дифференцированного анализа; для этого разработана методология разделения влияния основных геомеханических и технологических факторов, группирования и систематизации показаний параметров, характеризующих режимы работы оборудования;

- установлена особенность распределения давления  $P_i$  в гидростойках секций по длине струговой лавы, выражающаяся в отсутствии устойчивой закономерности изменения функции  $P_i(Z)$  вне зависимости от остальных влияющих факторов – колебания усредненных значений давления составляют 5-14% и обусловлены изменениями структуры надугольной толщи вдоль лавы;

- разделение секций на группы по величине отставания  $\delta$  от груди забоя позволило установить устойчивую закономерность увеличения давления  $P_i$  в незадвинутых секциях по сравнению с секциями, передвинутыми к груди забоя: разница в величинах давлений составляет порядка 20% на протяжении всей длины лавы;

- среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания очистного забоя стабильно влияет на давление  $P_i$  в гидростойках вне зависимости от координаты  $Z$  расположения секции по длине лавы и ее положения  $\delta$  относительно груди забоя;

- для незадвинутых секций градиент снижения давления  $P_i$  с увеличением скорости  $V_c$ , как правило, выше, что обусловлено более интенсивным опусканием пород кровли с увеличением расстояния  $\delta$  от груди забоя;

- в изученном диапазоне (3,2-11,4 м/сут.) скоростей  $V_c$  среднесуточного подвигания очистного забоя прослеживается закономерность ослабления влияния параметра  $V_c$  на давление  $P_i$  в гидростойках секций при повышенных значениях  $V_c$ , а в целом в данном диапазоне  $V_c$  величина давления снижается от 15 до 43%;

- для установления наиболее объективных закономерностей формирования нагрузки на крепь в зависимости от основных влияющих факторов необходим постоянный мониторинг работы механизированного комплекса, расширяющий базу данных для проведения исследований и выработки надежных рекомендаций.

## **11. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИЖЕНИЯ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО СЛОИСТОГО МАССИВА СЛАБЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

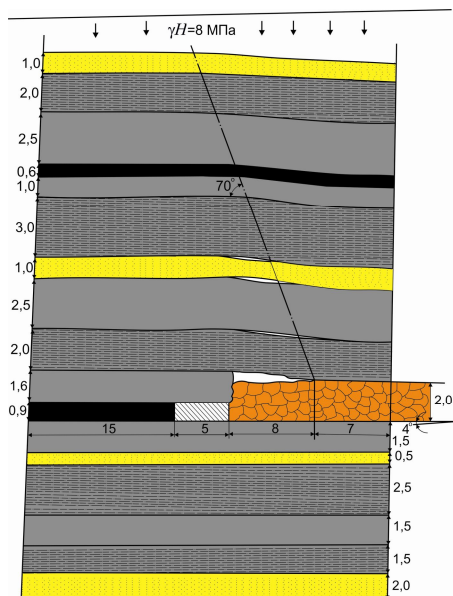
### **11.1. РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ**

Накопленные результаты мониторинга работы стругового комплекса в части анализа факторов, влияющих на развитие нагрузки на механизированную крепь, а также основные положения разработанного механизма сдвижения надугольной толщи указывают на необходимость проведения серии многофакторных вычислительных экспериментов на базе современных компьютерных программ моделирования поведения геологической среды. Это позволит кардинально расширить диапазон возможных сочетаний геомеханических и конструктивно-технологических факторов, влияющих на ведение очистных работ, так как шахтные наблюдения характеризуются чрезвычайной ограниченностью сочетаний вышеуказанных параметров и трудностью разделения их влияния при выявлении той или иной закономерности. Поэтому разработка компьютерной модели сдвижения углевмещающего массива в окрестности очистного забоя и последующий расчет НДС ее элементов является неотъемлемой частью современного подхода к геомеханическим исследованиям.

Разработка модели геомеханических явлений, сопровождающих очистные работы в лаве, включает обоснование параметров основных составляющих процесса, которые были отмечены ранее при раскрытии механизма взаимодействия пород надугольной толщи с крепью механизированного комплекса:

- структура и механические характеристики углевмещающего массива в пределах распространения аномалий горного давления, вызванных очистными работами;
- структура и механические характеристики обрабатываемого угольного пласта  $C_6$ ;
- параметры областей сдвижения надугольной толщи, включая: мощность и свойства пород зоны беспорядочного обрушения в выработанном пространстве, структуру и характеристики контактов элементов строения зоны шарнирно-блокового сдвижения с геометрией образующихся породных консолей за пределами ограждения секций механизированной крепи;
- геометрические и силовые параметры механизированной крепи;
- технологические параметры ведения очистных работ, обусловленные технической характеристикой применяемого очистного оборудования: длина

Теперь рассмотрим спектр механических характеристик каждой литологической разности, необходимый для наиболее адекватного и достоверного моделирования геомеханических процессов в окрестности очистного забоя. Общепринято [93, 98, 128-130], что наиболее объективно состояние горной породы отражает полная диаграмма ее деформирования, включающая стадии: упруго-пластическую, разупрочнения и разрыхления; кроме того, все стадии развиваются во времени и должны включать реологическую составляющую процесса деформирования. Построение и расчет НДС такой модели слоистого горного массива само по себе сопряжено с чрезвычайными техническими и математическими трудностями, не говоря о структурной неоднородности массива, сложной геометрии модели и переменных силовых параметрах. Поэтому попытка выполнения расчета НДС модели в рамках пакета программ (даже самых новейших версий) Solid Works не увенчалась успехом как по техническим причинам



**Рис. 11.1. Вертикальное сечение (плоскость  $XY$ ) схемы расчета НДС угле вмещающего массива при отработке 161-й лавы ПСП «Шахта «Степная»**

(ограниченный вычислительный ресурс), так и по возможностям самих программ, обладающих потенциалом для решения отдельных достаточно упрощенных задач, рассматривающих ограниченное число параметров. То есть, решение ряда частных задач при существенной идеализации объекта возможно и допустимо, но перспектива развития геомеханических моделей в части их усложнения и более полного учета комплекса механических, геометрических и силовых параметров просматриваются весьма туманно.

На наш взгляд, раскрытие перспектив более объективного отражения геомеханических процессов связано с новейшим пакетом программ Ansys, потенциал которого позволяет моделировать геомеханические системы в достаточно полном объеме. Но здесь также возникают технические и технологические трудности:

- *технические* – необходим значительный вычислительный ресурс;

- *технологические* – освоение приемов моделирования применительно к особенностям геомеханических задач по отражению состояния горных массивов с учетом технологических параметров ведения очистных работ и технических характеристик применяемого оборудования.

С учетом отмеченных факторов нами принято методологическое решение по поэтапному усложнению физической сущности модели (упругая и упруго-пластическая постановки, полная диаграмма деформирования, учет реологических свойств) технологических параметров ведения очистных работ и технических характеристик применяемого оборудования. Поэтому, на первом этапе моделирования расчет НДС массива в окрестности очистного забоя ведется в упругой постановке. Но, учитывая перспективу усложнения физической стороны модели, были собраны, проанализированы и систематизированы достаточно полные данные по механическим свойствам всех литологических разностей, характерных для углевмещающей толщи пород Западного Донбасса. Обоснование моделируемых значений механических характеристик выполнено по данным горно-геологического прогноза 161-й лавы ПСП «Шахта «Степная» и известным исследованиям [125-127, 131] механических свойств пород Западного Донбасса, которые сведены в табл. 11.1.

Угольный пласт  $C_6$  простого строения в пределах выемочного участка имеет мощность 0,85-1,03 м с достаточно большим диапазоном изменения коэффициента крепости ( $f = 2,9...5,1$ ). При моделировании принято среднее значение сопротивления сжатию  $\sigma_{сж} = 40$  МПа, а сопротивление растяжению  $\sigma_p = 3,0$  МПа по данным горно-геологического прогноза; модуль деформации

$E = 0,3 \cdot 10^4$  взят из работы [132] для угольных пластов рабочей мощности Западного Донбасса. Хрупкий характер разрушения угля и средневывраженные реологические свойства позволили обосновать усредненные значения остальных характеристик полной диаграммы деформирования угля и его реологического показателя.

По третьему блоку позиций обоснованы следующие параметры модели.

Таблица 11.1

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДЕЛИРУЕМЫХ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ  
РАЗНОСТЕЙ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ В ПРЕДЕЛАХ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА  
161-Й ЛАВЫ ПСП «ШАХТА «СТЕПНАЯ»**

Механические характеристики		$\sigma_{сжс}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$E \cdot 10^4$ , МПа	$\frac{\sigma_{сжс}^0}{\sigma_{сжс}}$	$\frac{M}{E}$	$\frac{\chi}{\beta}$
Лито­ло­гическая разность	1. Песчаник	50,0	3,3	3,0	0,1	4,0	0,20
	2. Алевролит	35,0	2,3	1,0	0,15	2,5	0,25
	3. Аргиллит	21,5	2,0	0,5	0,20	1,0	0,35
	4. Пласт $C_6^1$	35,0	1,0	0,3	0,10	3,0	0,20
	5. Аргиллит	23,0	1,5	0,5	0,20	1,0	0,35
	6. Алевролит	29,0	2,3	1,0	0,20	2,0	0,30
	7. Песчаник	50,0	3,3	2,0	0,10	3,0	0,20
	8. Аргиллит	25,0	1,5	0,5	0,20	1,0	0,35
	9. Алевролит	33,5	2,8	1,0	0,20	1,5	0,30
	10. Аргиллит	26,5	1,5	0,2	0,25	0,5	0,40
	11. Пласт $C_6$	40,0	3,0	0,3	0,10	3,0	0,20
	12. Аргиллит	24,5	2,5	0,2	0,25	0,5	0,40
	13. Песчаник	50,0	3,0	2,0	0,10	3,0	0,20
	14. Алевролит	30,0	2,5	1,0	0,15	2,0	0,25
	15. Аргиллит	21,5	1,5	0,3	0,25	0,8	0,40
	16. Алевролит	31,5	2,5	1,0	0,15	2,5	0,20
	17. Песчаник	55,0	3,5	2,0	0,08	4,0	0,15

Практикой ведения очистных работ в Западном Донбассе установлено, что непосредственная кровля обрушается сразу же за ограждением секций механизированной крепи. Основная кровля также послойно обрушается, но с некоторым отставанием от механизированной крепи, а поскольку увеличения в объеме обрушенной непосредственной кровли как правило не хватает для создания подпора основной, то на некоторое расстояние от секций образуется полость между разрушенной непосредственной кровлей и опускающейся основной. По мере отхода лавы эта полость уменьшается по высоте из-за изгиба слоев основной кровли и при обрушении нижних исчезает вовсе. Породы Западного Донбасса характеризуются повышенной деформативностью и величину их прогиба без обрушения можно оценить до 60% вынимаемой мощности [91] – тогда длина полости (по координате  $X$ ) будет достаточно ограничена и в разрабатываемой геомеханической модели она принята 8 м. Наблюдениями за процессом обрушения основной кровли в

Западном Донбассе выявлено, что посадка основной кровли в традиционном понимании обычно не прослеживается, а происходит плавный изгиб ее слоев с опусканием на обрушенные породы, без явно выраженных динамических явлений.

Далее в выработанном пространстве слои основной кровли ложатся на обрушенные породы и деформируют их до исходной величины вертикального горного давления  $\sigma_y = \gamma H$  на определенном расстоянии от лавы. Вблизи лавы усилия на контакте основной кровли и обрушенных пород определяют модулем деформации  $E_{об}$  последних; для определения его величины мы



**Рис. 11.2. Схема расчета НДС геомеханической системы в плоскости напластования (плоскость  $XZ$ )**

использовали экспериментальные исследования [133, 134] по нагружению бутовых охранных полос на шахтах Западного Донбасса. Обработка результатов этих исследований на предмет определения величины  $E_{об}$  показала нелинейное увеличение  $E_{об}$  по мере сжатия (что вполне согласуется с положениями механики сыпучих сред и горных пород), но нас больше интересует начальный участок контакта (вслед за полостью), где и происходит наиболее активный изгиб слоев основной кровли. Здесь на длине контакта 7 м (суммарное расстояние от секций крепи 15 м) расчетный модуль деформации обрушенных пород составляет  $E_{об} = 3$  МПа, что и заложено в модели. Таким образом, общая длина модели в выработанном пространстве составляет 15 м, как это пока-

зано на рис. 11.1 (вертикальное сечение в плоскости  $XY$ ) и рис. 11.2 (вид сверху по напластованию в плоскости  $XZ$ ). Предварительное тестирование модели показало, что такого расстояния по координате  $X$  вполне достаточно для описания главных процессов опускания основной кровли в выработанное пространство. Распределение усилий на контактах слоев опускающейся основной кровли определяется уже в процессе расчета ее НДС в зависимости от мощности и деформационных характеристик слагающих слоев.

Впереди очистного забоя исследуется расстояние в 15 м нетронутого угольного пласта, что обусловлено тем, что на этом расстоянии практически полностью размещается зона опорного давления впереди лавы, так как крепкий угольный пласт  $C_6$  (по отношению к породам кровли и почвы) концентрирует опорное давление вблизи груди забоя.

При моделировании геометрических и силовых параметров механизированной крепи приняты следующие допущения. На первом этапе расчета НДС геомеханической системы в упругой постановке отразить реальную рабочую характеристику гидростоек и секций механизированной крепи в целом не представляется возможным, поскольку за линейной (упругой) стадией сопротивления следует «пилообразный» режим податливости, когда периодически срабатывают предохранительные клапаны и происходит задвижка штоков в гидроцилиндры под воздействием горного давления. Но, данный режим достаточно экстремальный, когда механизированная крепь работает на пределе своей несущей способности с вероятностью последующей посадки на «жесткую базу». Наша же задача – обосновать параметры ведения горных работ, не допускающие данную ситуацию. Поэтому принята работа на участке линейного сопротивления  $P$  гидростоек, когда опусканию кровли соответствует линейное увеличение сопротивления  $P$ . Следовательно, необходимо определить коэффициент пропорциональности между этими параметрами, который аналогичен модулю деформации  $E_{кр}$  крепи.

Для облегчения процесса расчета НДС геомеханической системы «массив-крепь» принимается равномерная реакция крепи на породы непосредственной кровли и почвы, что достигается заменой реальной конструкции секции на параллелепипед с модулем деформации  $E_{кр}$ . Величина  $E_{кр}$  в жестком режиме работы рассчитывается из следующих соображений. При линейной связи реакции  $P$  гидростойки и ее податливости  $\Delta U$  справедливо соотношение

$$E_{кр} = \frac{P_{max}}{\varepsilon_{кр}}, \quad (11.1)$$

где  $P_{max} = 533...629$  кПа – несущая способность секции;

$$\varepsilon_{кр} = \frac{\Delta U}{m} \text{ – относительная податливость гидростойки;}$$

$m \approx 0,9...1,0$  м – вынимаемая мощность пласта.

Относительно податливости  $\Delta U$  гидростойки в жестком режиме ее работы можно отметить, что она обусловлена некоторым сжатием самой рабочей жидкости в поршневой полости гидростойки и люфтами в шарнирах крепления гидростойки. В первом приближении ее можно оценить в  $\Delta U = 10$  мм; тогда  $E_{кр} = 48...63$  МПа. Для расчета сначала примем усредненное значение  $E_{кр} = 55$  МПа, хотя в дальнейшем не представляет никаких трудностей варьировать параметром  $E_{кр}$  в широком диапазоне вплоть до наступления режима податливости ( $E_{кр} = 2...6$  МПа).

Последний блок позиций в обосновании компьютерной модели касается



технологических параметров ведения очистных работ: длина лавы  $Z$ , ее среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания, скорость подачи  $V_k$  углевыемочной машины и ширина захвата  $B$  ее исполнительного органа.

Предварительные тестовые расчеты НДС показали, что по крайней мере в центральной части лавы (где формируется максимальная высота зон обрушенных пород и шарнирно-блокового сдвижения, развиваются наибольшие опускания кровли) влияния ее длины не прослеживается. Аналогичные выводы сделаны при мониторинге работы струговой лавы и анализе показаний давления в поршневых полостях гидростоек секций по ее длине  $Z$ . Поэтому на первом этапе расчета НДС геомеханической системы исключена из переменных параметров длина лавы, а для экономии вычислительных ресурсов рассматривается ее центральная часть шириной 20 м (см. рис. 11.2).

Среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания очистного забоя и скорость подачи  $V_k$  углевыемочной машины связаны с моделированием временных параметров очистных работ (реологическая задача), которые планируется осуществлять поэтапно вслед за условно-мгновенной упругой постановкой задачи, исследуемой на первом этапе в соответствии с разработанной методологией последовательного усложнения геомеханической модели. Поэтому в данном блоке расчетов НДС системы параметры  $V_c$  и  $V_k$  приняты постоянными, а их влияние учитывается по результатам экспериментальных исследований развития нагрузки на механизированную крепь.

Ширина захвата  $B$  исполнительного органа определяется конструкцией углевыемочной машины и изменяется от минимального значения 50 мм для стругового исполнительного органа (его нижний предел) до 700-800 мм для комбайнов со шнековыми и барабанными исполнительными органами. Предварительные тестовые расчеты показали, что волна возмущения горного давления в зоне работы исполнительного органа при  $B = 50$  мм малосущественна и имеет весьма ограниченные размеры; поэтому, для более значимого выявления изменения НДС в зоне работы исполнительного органа его ширина захвата моделируется на первом этапе величиной  $B = 700$  мм. Если при этой величине выявятся незначительные изменения НДС, то при  $B = 50$  мм тем более можно исключить влияние ширины захвата исполнительного органа в зоне работы комбайна по сравнению с остальной длиной забоя; в противном случае необходимо выявить диапазон существенного влияния параметра  $B$ .

В итоге разработана и обоснована компьютерная модель для расчета НДС геомеханической системы в районе лавы, которая является первым этапом к численному выявлению закономерностей связи процессов сдвижения угле-вмещающего массива и технологических параметров очистных работ.

## 11.2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

В соответствии с разработанной геомеханической моделью поведения углевмещающего массива в окрестности очистного забоя произведен расчет ее НДС и выработана система наглядного представления НДС основных элементов модели. Комплексность и объективность этого представления достигнута сочетанием двух направлений, связанных с пространственной постановкой задачи. Во-первых, подлежит последующему анализу пять компонент НДС: вертикальные напряжения  $\sigma_y$ , горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ , пер-

пендикулярные груди забоя и из-за малого угла падения пласта ( $\alpha = 4^\circ$ , см. рис. 11.1) практически параллельные плоскости его напластования; горизонтальные напряжения  $\sigma_z$ , параллельные груди забоя; интенсивность или приведенные напряжения  $\sigma$ , выражающие совместный результат действия вышеперечисленных компонент, по которым оценивается предельное состояние массива в области сжатия; полные перемещения  $U$  массива, характеризующие как величину, так и направление сдвижения пород. Во-вторых, пространственность модели вызывает необходимость в отражении эпюр распределения компонент в разных сечениях геомеханической системы. На наш взгляд наиболее информативные для оценки состояния системы (при их минимально допустимом количестве) будут следующие сечения:

– *вид №1* – изометрия, проходящая по угольному пласту на расстоянии 0,1 м от забоя для группы задвинутых к груди забоя секций (см. рис. 11.2), далее сечение перпендикулярно забою (начиная от угольного уступа) с разрезом ближайшей незадвинутой секции и выработанного пространства позади лавы, а затем по выработанному пространству параллельно лаве (пример такого сечения представлен для эпюры  $\sigma_y$  на рис. 11.3, а);

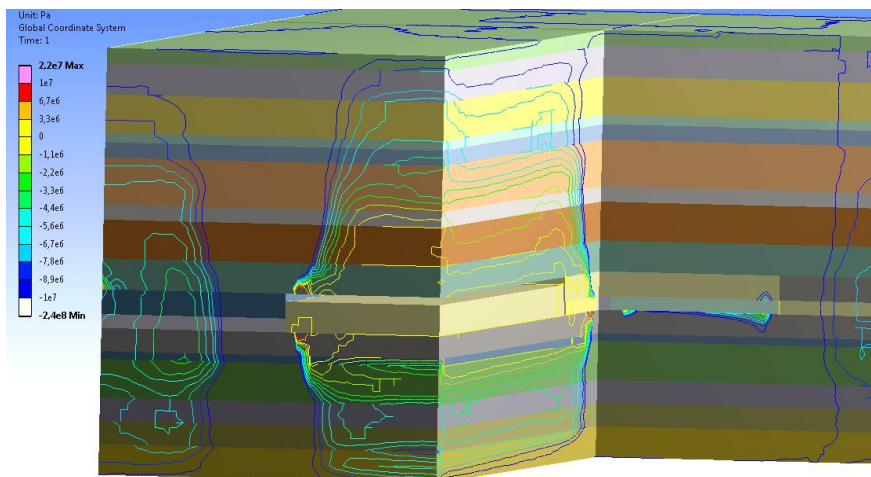
– *вид №2* – изометрия, проходящая в выработанном пространстве рядом (расстояние 0,1 м) с ограждением задвинутых к груди забоя секций, далее сечение проходит перпендикулярно груди забоя по ближайшей незадвинутой секции и выработанному пространству и затем по выработанному пространству параллельно забою лавы (пример такого сечения представлен для эпюры  $\sigma_y$  на рис. 11.3, б);

– *вид №3* – плоское сечение  $XY$ , перпендикулярное груди забоя, проходящее по крайней незадвинутой секции (пример для эпюры  $\sigma_y$  приведен на рис. 11.4, а);

– *вид №4* – плоское сечение  $YZ$  по угольному пласту на расстоянии 0,1 м от груди забоя (пример для эпюры  $\sigma_y$  приведен на рис. 11.4, б).

Указанные сечения взаимодополняют друг друга и дают наиболее полную картину полей распределения каждой компоненты НДС, анализ которых выполнен по приведенным на рис. 11.3 и рис. 11.4 эпюрам изолиний вертикальных напряжений  $\sigma_y$ .

а)



б)

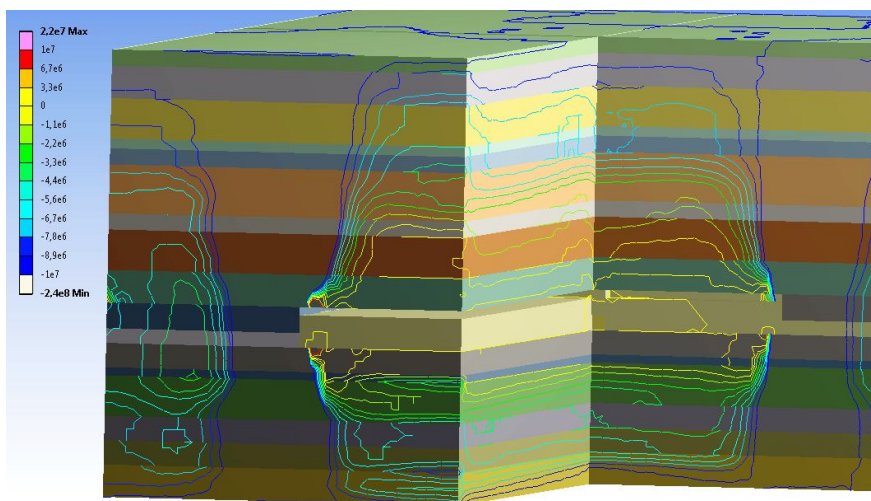


Рис. 11.3. Изолинии вертикальных напряжений  $\sigma_y$  для сечений:

а) вид №1; б) вид №2

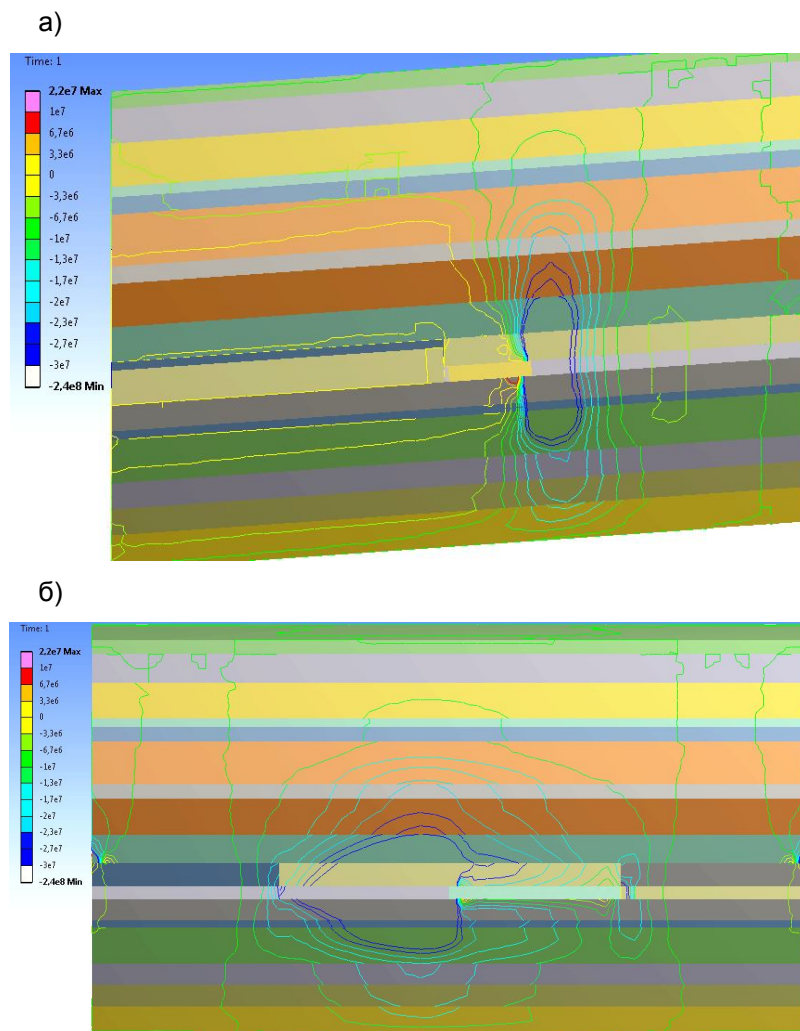


Рис. 11.4. Изолинии вертикальных напряжений  $\sigma_y$  для сечений:  
а) вид №3; б) вид №4

На участке задвинутых секций впереди груди забоя (расстояние 0,1 м) действует опорное давление (см. рис. 11.3, а и рис. 11.4, б) весьма значительной величины:

– концентрация вертикальных напряжений по отношению к исходному состоянию ( $\sigma_y = \gamma H$ ) распространяется по всей длине лавы и ее минимальное

значение составляет  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 2,5...3,4$ ;

– при приближении к уступу забоя, где размещается исполнительный орган комбайна, концентрация  $\sigma_y$  возрастает и составляет до  $(5,0...6,2)\gamma H$  на расстоянии до 8,3 м от угольного уступа, а на расстоянии до 2,5 м концентрация достигает до  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 8,4...10$ .

Таким образом, выявлена значительная концентрация вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в зоне работы исполнительного органа комбайна с шириной захвата 0,7 м, которая безусловно разупрочняет угольный пласт, что, с одной стороны, облегчает отделение угля от массива, а, с другой, – повышает горное давление в районе работы комбайна.

На участке незадвинутых секций, то есть впереди комбайна рассматривается сечение в угольном пласте, отстоящее на 0,8 м от груди забоя. Здесь концентрация опорного давления снижается: величина  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 3,4...3,8$  распространяется вдоль лавы до 7,5 м от угольного уступа на высоту до 4,2 м, затрагивая два слоя основной кровли.

В целом выявлено значительное опорное давление вблизи забоя, которое в зоне работы исполнительного органа комбайна увеличивается в несколько раз по отношению к среднему по длине лавы. Следовательно, при ширине захвата исполнительного органа 0,7 м наблюдается интенсивная волна напряжений  $\sigma_y$ , которую необходимо учитывать при работе механизированного комплекса. Существенное опорное давление объясняется повышенной крепостью угольного пласта по отношению к породам непосредственной кровли и почвы, которая отличается до 2 раз, а при обводнении аргиллита и алевролита разница еще больше возрастает.

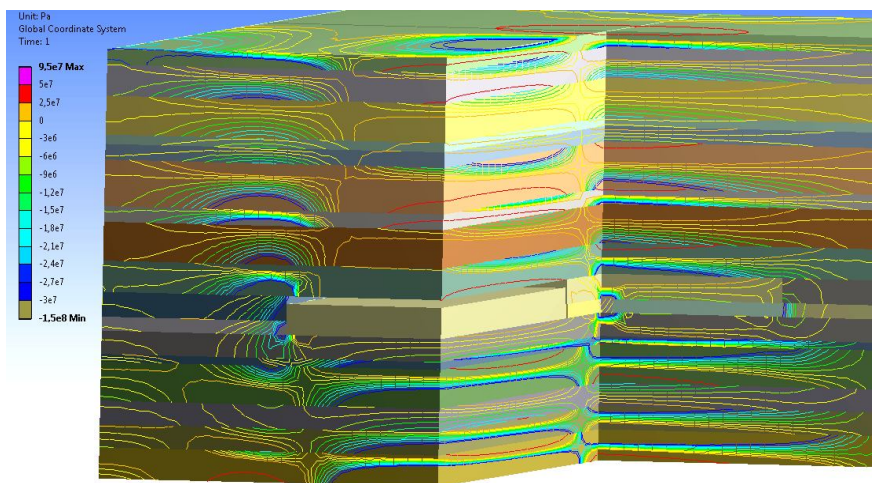
НДС кровли над механизированной крепью (см. рис. 11.3 и рис. 11.4, а) и в выработанном пространстве характеризуется следующими особенностями. Над краем консоли секции крепи на расстоянии до 0,5 м от груди забоя происходит интенсивное падение вертикальных напряжений от  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 2,5...3,4$  до

$\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0,4...1,0$ ; на остальной длине перекрытия  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0...0,1$ . В выработанном

пространстве  $\sigma_y$  падают до нуля по длине полости между обрушенными породами непосредственной и зависающими породами основной кровли; далее при образовании контакта между ними  $\sigma_y$  увеличивается до  $(0,1-0,4)\gamma H$ , то есть, породы кровли в выработанном пространстве находятся в разгруженном состоянии на моделируемом участке. Для сечения с секциями до угольного уступа

(см. рис. 11.3, б) механизированная крепь находится в более разгруженном состоянии без образования концентраций  $\sigma_y$  на краю консоли, а в выработанном пространстве эпюра практически идентична предыдущей. Приведенные данные расчета НДС в целом соответствуют положениям разработанного механизма опускания кровли и ее взаимодействия с механизированной крепью.

а)



б)

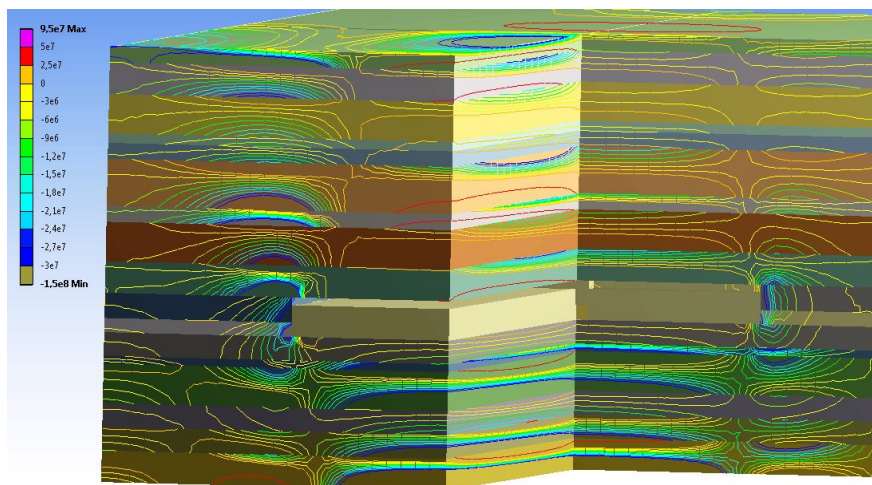


Рис. 11.5. Изолинии горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  для сечений:  
а) вид №1; б) вид №2

Далее рассмотрены горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ , перпендикулярные очистному забою, изолинии которых по видам № 1 и № 2 представлены на рис. 11.5, по видам №3 и №4 – на рис. 11.6. Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  (также как и  $\sigma_z$ ) – наиболее информативная компонента при оценке прогибов слоев кровли в районе лавы. Наибольший градиент изменения  $\sigma_x$  по мощности каждого слоя (от растягивающих в верхней части до сжимающих в нижней) наблюдается в районе угольного уступа, который проявляется даже на верхней границе модели (высота от кровли пласта 17,2 м) и распространяется до 7,7 м в сторону вынудой полосы угля и до 6,1 м за угольным уступом. С приближением к пласту  $C_6$  прогиб слоев увеличивается, а расстояние начала существенного прогиба слоев впереди лавы также возрастает и изменяется от 3,0-3,5 м в нижележащих слоях, до 1,5-2,5 м в вышележащих слоях основной кровли. Выявленная особенность подтверждает существующие представления о сдвигении надугольной толщи и разработанный механизм протекания процесса в условиях Западного Донбасса.

Над механизированной крепью, несмотря на ее отпор, происходит изменение знака кривизны породных слоев основной кровли; геометрическое место точек перегиба слоев лежит на линии, начинающейся от груди забоя (со смещением 0,2-0,3 м в сторону выработанного пространства) и распространяющейся в основную кровлю под углом 75-80°, что несколько выше значений этого угла в существующих исследованиях. Некоторое несоответствие полученных значений внутреннего угла полных сдвижений объясняется повышенной деформативностью пород Западного Донбасса, которые изгибаются и обрушаются без образования протяженных консолей, что подтверждает ряд положений разработанного механизма развития процесса сдвигения надугольной толщи и соответствует шахтным наблюдениям о слабых проявлениях горного давления при посадке основной кровли.

За механизированной крепью начинается интенсивный прогиб слоев с появлением значительных растягивающих  $\sigma_x$  в нижней части каждого слоя и сжимающих  $\sigma_x$  в его верхней части. При этом они послойно опускаются на обрушенные породы непосредственной кровли, а интенсивность их прогиба имеет общую тенденцию к снижению с удалением от пласта, но здесь следует учитывать проявляющиеся аномалии изгиба и изолиний  $\sigma_x$ : слои с пониженным модулем деформации опускаются более интенсивно, но, благодаря подпору нижележащих слоев повышенной жесткости, напряжения  $\sigma_x$  в них значительно меньше (как растягивающие, так и сжимающие); то же происходит, если сверху рассматриваемого слоя залегает более жесткий породный слой, как это ранее рассмотрено при описании механизма сдвигения надугольной толщи. В более жестких слоях, наоборот, опускание меньше, а величина  $\sigma_x$  выше, чем в более податливых, что полностью соответствует ряду классических положений механики горных пород.



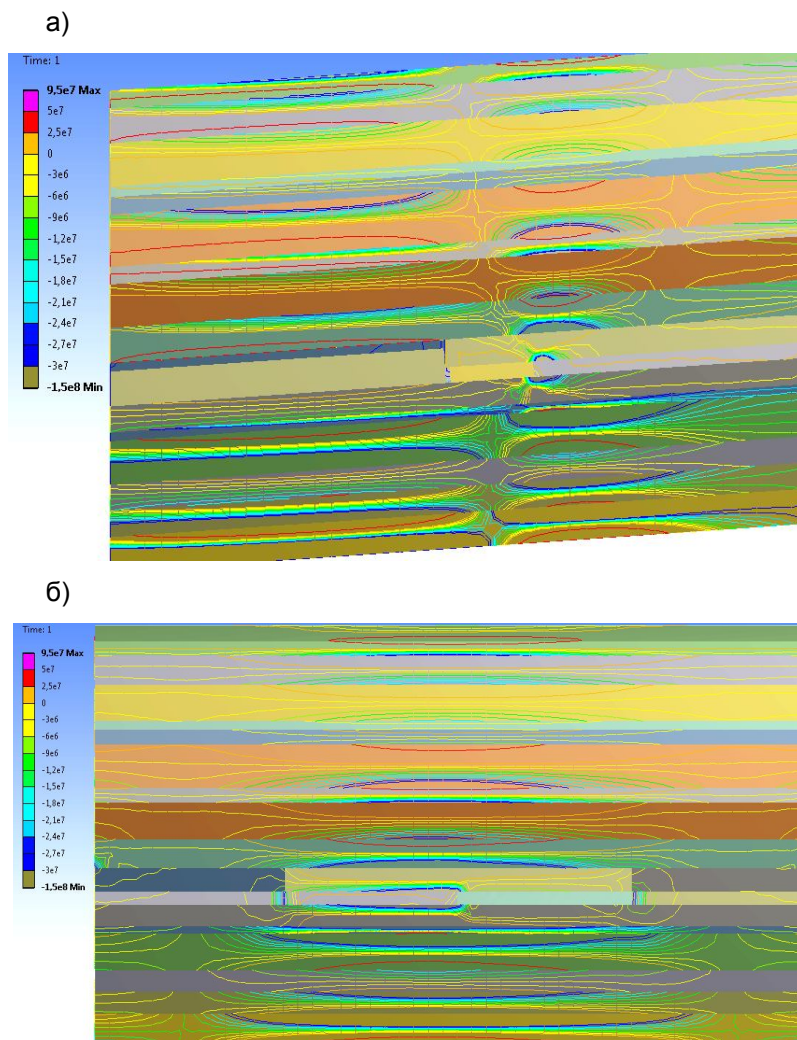


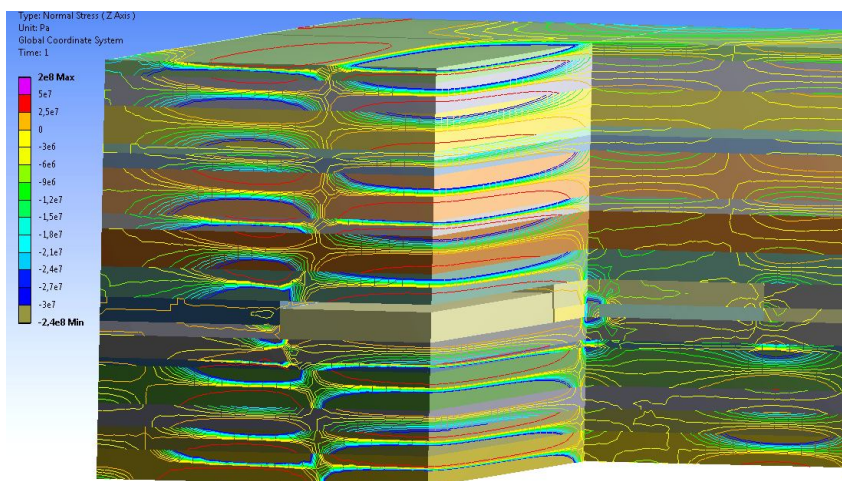
Рис. 11.6. Изолинии горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  для сечений:  
а) вид №3; б) вид №4

Вдоль лавы более существенный прогиб слоев имеет место в районе угольного уступа, определяемого положением комбайна, и, как правило, этот прогиб локализуется на длине лавы до 10 м в одну и другую стороны от угольного уступа. По координате  $X$  указанный прогиб проявляется за несколько метров за ограждением секций крепи. Тем не менее, волна напряжений  $\sigma_x$  (также как и  $\sigma_y$ ) имеет место в районе работы комбайна с шири-



ной захвата 700 мм и это следует учитывать при оценке устойчивости забоя и развития нагрузки на крепь.

а)



б)

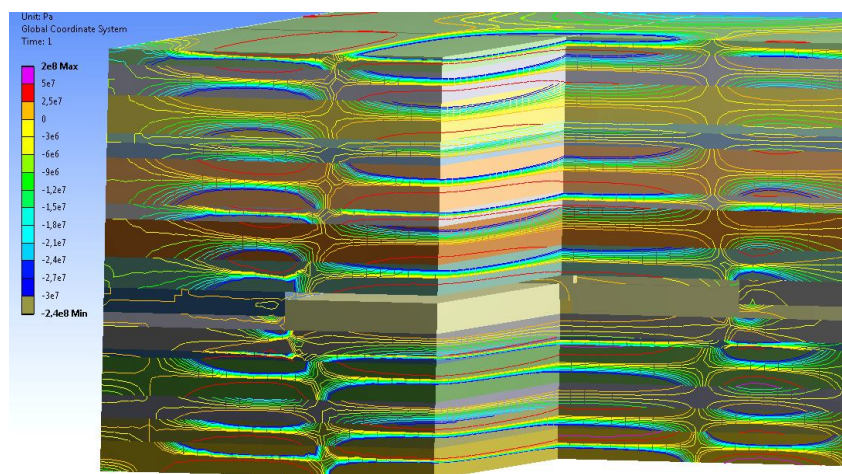
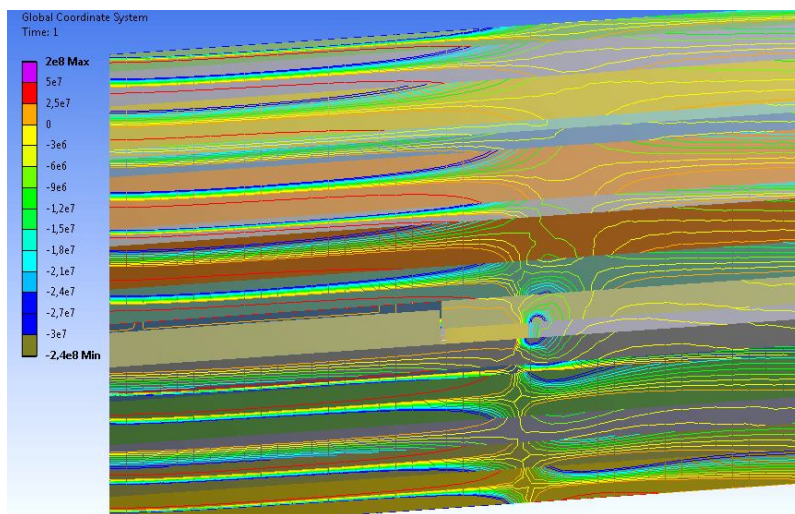


Рис. 11.7. Изолинии горизонтальных напряжений  $\sigma_z$  для сечений:  
а) вид №1; б) вид №2

Следующей компонентой для анализа НДС являются горизонтальные напряжения  $\sigma_z$ , действующие параллельно очистному забою; их эпюры представлены на рис. 11.7 для видов №1 и №2 и рис. 11.8 для сечений №3 и

№4. Изолинии компоненты  $\sigma_Z$  наиболее полно характеризуют изгиб породных слоев параллельно груди забоя, то есть, в плоскости  $YZ$ .

а)



б)

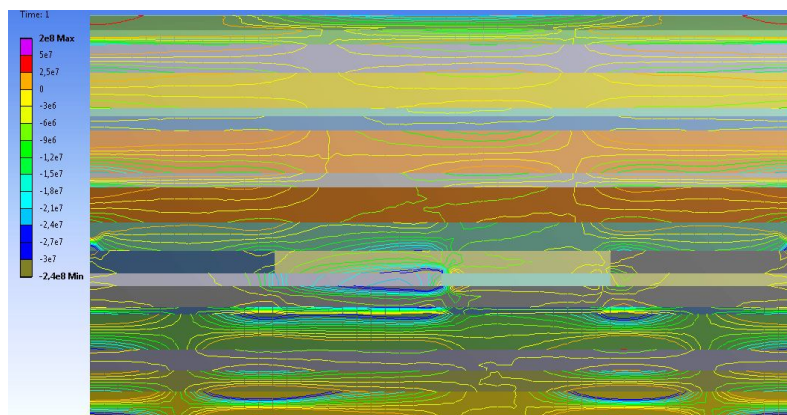


Рис. 11.8. Изолинии горизонтальных напряжений  $\sigma_Z$  для сечений:  
а) вид №3; б) вид №4

Практически на кромке угольного пласта (расстояние 0,1 м от груди забоя) по длине уже вынутой полосы угля до уступа изгиб слоев кровли в плоскости  $YZ$  имеет место в направлении пласта, но величина прогиба и градиент изменения  $\sigma_Z$  по мощности каждого слоя не так сильно выражен

как для компоненты  $\sigma_x$  (см. рис. 11.7, а): растягивающие  $\sigma_Z$  появляются только в мощном (3,0 м) и достаточно жестком ( $E = 1 \cdot 10^4$  МПа) алевролите – пятом по счету от угольного пласта слое кровли; в верхней части каждого слоя сжимающие  $\sigma_Z$  всего в 1,2-1,6 раза превышают исходное состояние нетронутого массива.

В плоскости  $XY$ , перпендикулярной груди забоя, наблюдается значительный изгиб слоев кровли и градиент изменения  $\sigma_Z$  в пределах мощности каждого слоя (в верхней части растяжение, в нижней – сжатие), что вполне объяснимо их прогибом и последующим обрушением в выработанное пространство – ведь изгиб слоев происходит не только в плоскости  $XY$  (более значительный), где определяющей компонентой является  $\sigma_x$ , но и в плоскости  $YZ$  (вдоль лавы), что и подтверждается линиями компоненты  $\sigma_Z$ . Таким образом, благодаря изгибу породных слоев в плоскости  $YZ$  они разбиваются растягивающими напряжениями  $\sigma_Z$  на породные блоки, что соответствует сложившимся представлениям о наличии зоны шарнирно-блокового сдвижения, заключенной между зоной беспорядочного обрушения (непосредственная кровля и нижний слой основной) и зоной плавного прогиба слоев без нарушения сплошности; последняя находится за пределами высоты модели, так как даже самый удаленный от пласта слой (17,2 м) испытывает значительные растягивающие напряжения  $\sigma_Z$  (до 10-12 МПа) в верхней части своей мощности.

Для вида №2 (см. рис. 11.7, б), где все сечения расположены в выработанном пространстве, картина изолиний  $\sigma_Z$  схожа с таковой для предыдущего вида № 1, где часть сечений также расположена в выработанном пространстве.

Сечения в плоскости  $YZ$  (см. рис. 11.8, а) и  $XY$  (см. рис. 11.8, б) подтверждают ранее выявленные особенности. Здесь следует отметить, что с продвижением в глубь нетронутого пласта изгиб существенно проявляется только для нижних слоев основной кровли, а при приближении к пласту  $C_6^1$  изгибные напряжения  $\sigma_Z$  распределяются по мощности слоев достаточно равномерно, что указывает на затухание деформаций на расстоянии до 10-12 м в глубь нетронутого пласта. Вдоль лавы со стороны еще невынутой полосы угля (расстояние от груди забоя 0,8 м в массив) изгибные напряжения  $\sigma_Z$  распространяются на меньшее расстояние, чем со стороны вынутой полосы угля; но, значительный градиент  $\sigma_Z$  по мощности слоя наблюдается только у жесткого и более крепкого песчаника и пласта  $C_6^1$ , как у элементов, воспринимающих на себя повышенную нагрузку.

В целом по результатам анализа изолиний компоненты  $\sigma_Z$  можно отметить следующее:

– *во-первых*, на расстоянии до 10-12 м в глубь пласта изгибные  $\sigma_z$  затухают, что указывает на достаточно ограниченные размеры зоны активных деформаций кровли (тождественной зоне опорного давления), как это и должно быть при жестком угольном пласте и слабых легкодеформируемых породах непосредственной кровли и почвы;

– *во-вторых*, над секциями механизированной крепи и в выработанном пространстве появляется интенсивный градиент изменения  $\sigma_z$  по мощности каждого слоя кровли, что указывает на их активный изгиб не только в плоскости  $XY$ , но и вдоль лавы в плоскости  $YZ$ .

Заключительной компонентой напряжений при анализе НДС геомеханической системы являются так называемые приведенные напряжения  $\sigma$ , изолинии которых показаны на рис. 11.9 для видов №1 и №2 и рис. 11.10 для видов №3 и №4. Как отмечалось ранее, приведенные напряжения  $\sigma$  характеризуют совместное действие всех компонентов напряжений и являются критериальным параметром для оценки устойчивости породного объема.

На участке вынута́й полосы угля до уступа (см. рис. 11.9, а) наиболее интенсивные  $\sigma$  проявляются (расстояние 0,1 м от груди забоя в массив) в более жестких слоях кровли в их верхней по мощности части, где достигают величины  $\sigma = 45...50$  МПа. Такая величина является разрушающей почти для всех литологических разностей, что обусловлено совместным действием сжимающих  $\sigma_y$  и растягивающих  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$ ; эта ситуация характеризуется как самое неблагоприятное сочетание напряжений с точки зрения целостного состояния породы. Поэтому у груди забоя уже происходит некоторое разупрочнение верхних частей наиболее жестких слоев, в то время как легко деформирующиеся слои испытывают гораздо меньше напряжения  $\sigma$ . Даже на верхней границе модели область разупрочнения жесткого песчаника развивается до 1,2-1,4 м в глубь массива.

Аналогичная ситуация происходит с состоянием породных слоев в выработанном пространстве (см. рис. 11.9, б): в верхней части каждого слоя сочетание сжимающих  $\sigma_y$  и растягивающих  $\sigma_x$  и  $\sigma_z$  приводит к формированию  $\sigma$  до 45-50 МПа, что, как правило, разупрочняет верхнюю часть слоя, а при его перегибе в выработанном пространстве – и нижнюю часть слоя. Это приводит к разбиению трещинами породных слоев на отдельные блоки и их опусканию на «постель» из обрушенных пород, что вполне согласуется с существующими представлениями и разработанными положениями механизма сдвигания надугольной толщи в выработанное пространство.



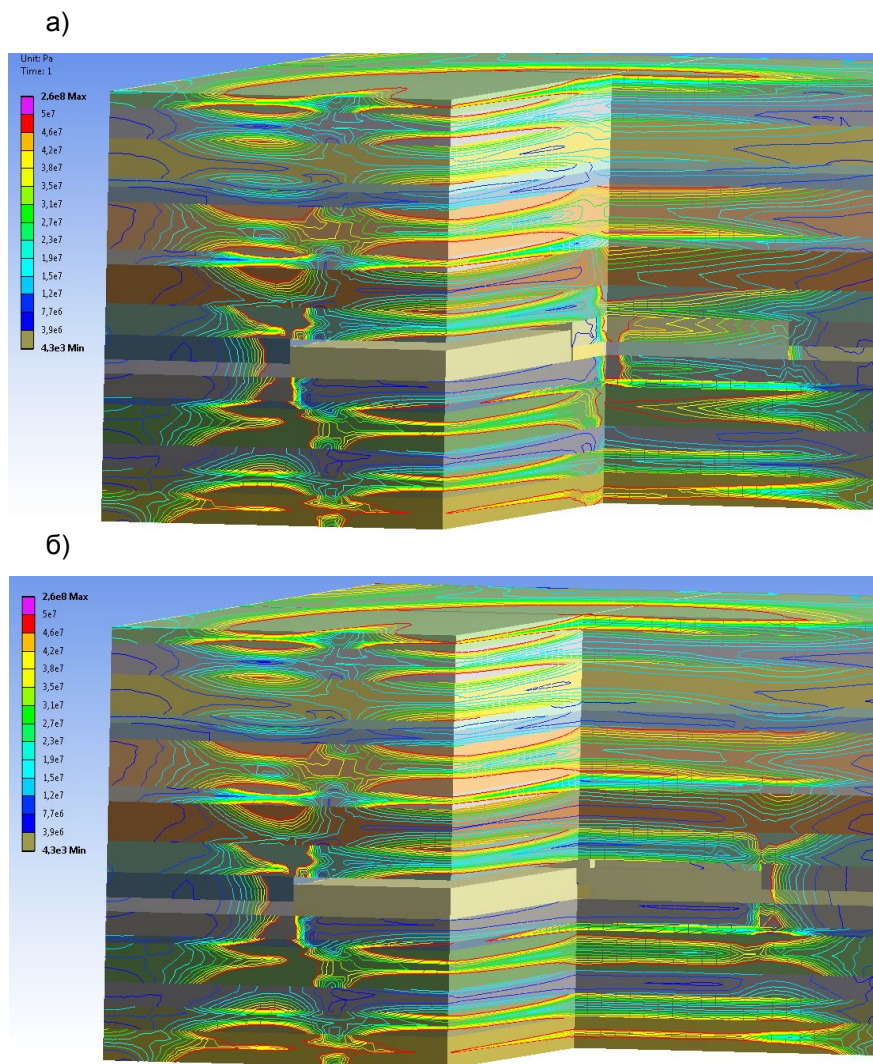
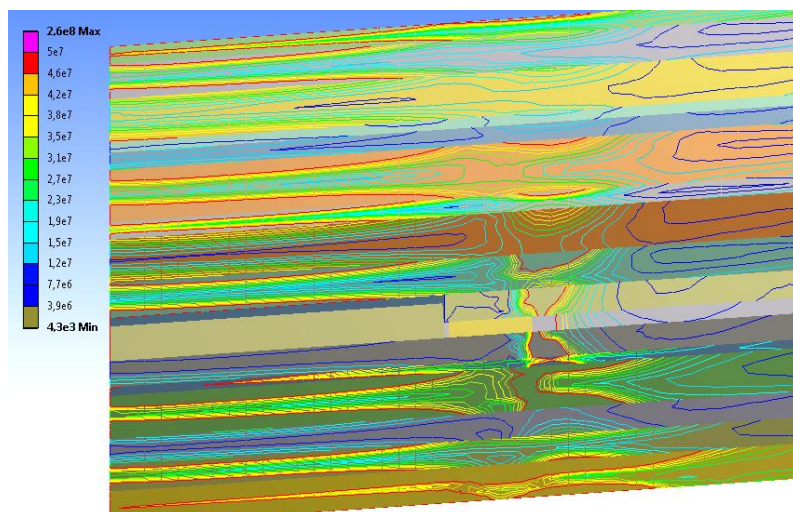


Рис. 11.9. Изолинии приведенных напряжений  $\sigma$  для сечений:  
 а) вид №1; б) вид №2

Области с максимальным  $\sigma$  расположены в районе груди забоя (см. рис. 11.10, а) и распространяются в глубину пласта на расстояние 2,5-3,0 м у более жестких слоев; у более податливых слоев таких максимумов не возникает вообще. При дальнейшем движении в глубину пласта величина  $\sigma$  стабилизируется на уровне, меньшем, чем предел прочности на сжатие любой литоло-

гической разности. Вдоль лавы (см. рис. 11.10, б) опасная концентрация  $\sigma$  располагается в верхней части более жестких слоев и распространяется на расстояние до 5,5-6,5 м от угольного уступа.

а)



б)

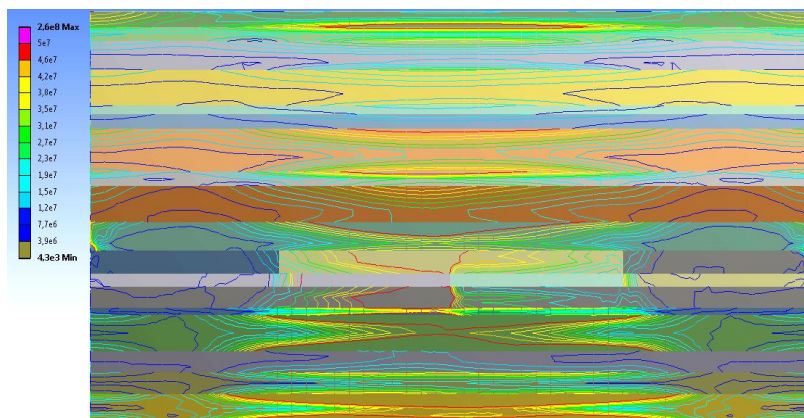


Рис. 11.10. Изолинии приведенных напряжений  $\sigma$  для сечений:  
а) вид № 3; б) вид № 4

Таким образом, разупрочнение пород кровли происходит, как правило, в верхних частях более жестких слоев и локализуется в районе угольного уступа на глубину в массив до 2,5-3,0 м.

### 11.3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОЛНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Как следует из самого понятия – напряженно-деформированное состояние массива – кроме компонент напряжений необходимо проанализировать и деформации массива, которые в интегральном виде реализуются в его перемещениях, что представляет наибольший интерес. Эпюры полных перемещений  $U$  приведены на рис. 11.11 для видов №1 и №2 и рис. 11.12 для видов №3 и №4.

В районе забоя (расстояние 0,1 м в глубь пласта, см. рис. 11.11, а) со стороны вынудой полосы угля наблюдается достаточно равномерное по длине лавы опускание кровли величиной  $U = 140...190$  мм, что следует учитывать при определении величины вынимаемой мощности пласта, чтобы оставался резерв раздвижности гидростоек секций для компенсации дальнейшего опускания кровли уже непосредственно над крепью. Указанная величина перемещений снижается до 50-98 мм только в районе концевых участков лавы, а по высоте кровли перемещения  $U$  относительно постоянны и скорее всего проявятся на дневной поверхности, что и наблюдается в Западном Донбассе.

Над секцией крепи в районе угольного уступа опускание кровли возрастает от  $U = 98...140$  мм на кромке консоли перекрытия до 330-380 мм на конце перекрытия, где располагается ограждение секций. В выработанном пространстве из-за обрушения непосредственной кровли и появления полости на границе с основной происходит рост опускания последней до 570-620 мм и далее в выработанном пространстве формируется некоторая стабилизация опускания основной кровли по причине появления ее контакта с обрушенными породами. Здесь по координате  $Z$  длины лавы (см. рис. 11.11, б) четко проявляется градиент опускания кровли: на концевых участках – минимум, посредине длины лавы в выработанном пространстве – максимум; этот факт вполне соответствует существующим представлениям об образовании свода в опускающемся массиве над выработанным пространством, который сродни своду естественного равновесия и предполагает преимущественное перемещение пород в центральной части (по координате  $Z$ ) выемочного участка. Указанные закономерности подтверждаются изолиниями полных перемещений кровли на рис. 11.12, а в плоскости  $XY$  и рис. 11.12, б в плоскости  $YZ$ .

Таким образом, моделирование сдвижения надугольной толщи выявило следующие особенности этого процесса:

- в районе груди забоя опускания кровли достаточно существенны  $U = 140...190$  мм и их следует учитывать для обеспечения стабильной работы механизированного комплекса и предотвращения его посадки на «жесткую базу»;

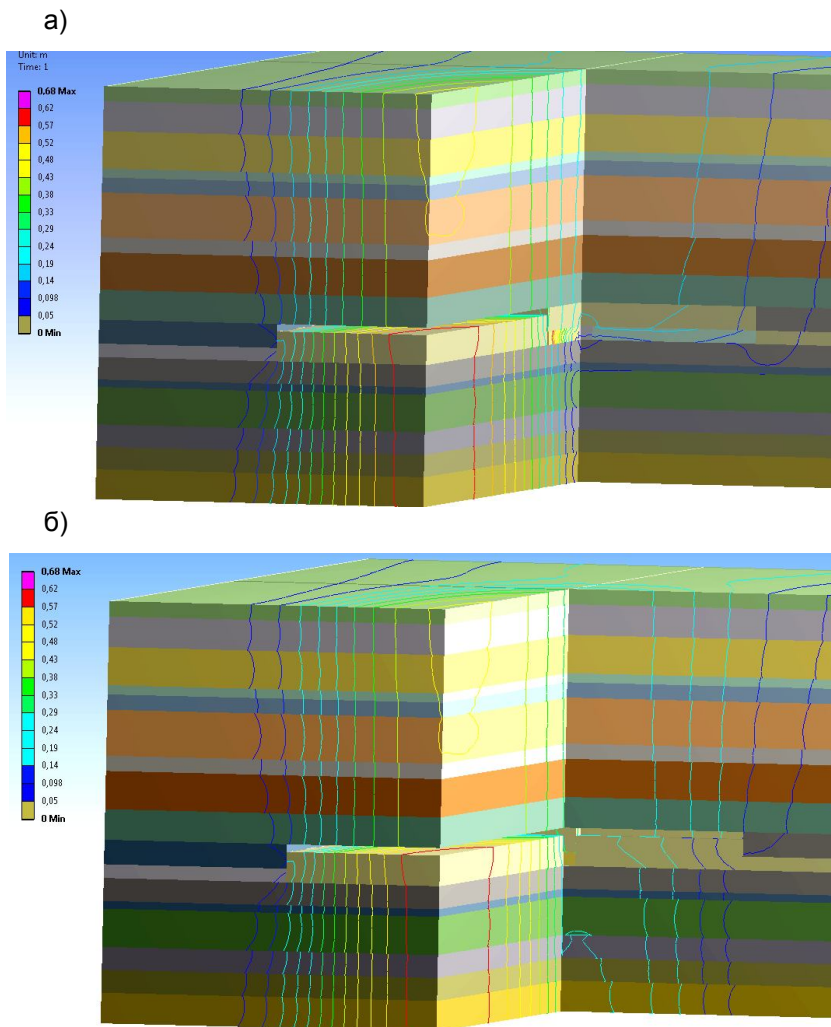


Рис. 11.11. Изолинии полных перемещений  $U$  для сечений:  
а) вид №1; б) вид №2

- по длине лавы (координата  $Z$ ) в районе забоя опускания кровли достаточно постоянны с их постепенным снижением только на концевых участках;
- по длине секции (координата  $X$ ) происходят увеличение опускания кровли до 330-380 мм в районе ограждения, но это компенсируется геометрией секции, у которой высота по задней кромке перекрытия порядка на 200 мм меньше, чем по передней кромке консоли;



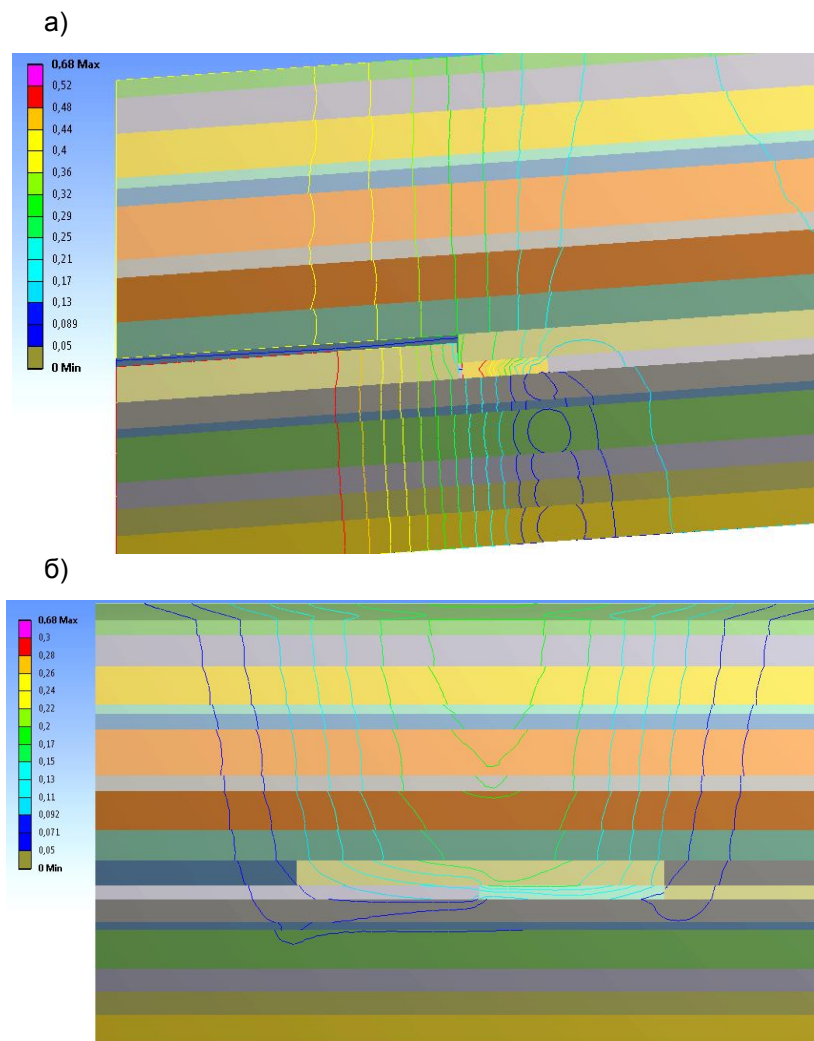


Рис. 11.12. Изолинии полных перемещений  $U$  для сечений:  
 а) вид №3; б) вид №4

– в выработанном пространстве позади механизированной крепи опускания основной кровли увеличиваются до 570-620 мм и стабилизируются при появлении контакта между обрушенными породами и основной кровлей, разбитой на блоки;

– по вертикальной координате  $Y$  перемещения основной кровли достаточно постоянны и при экстраполяции за пределы высоты модели прогнози-

руется образование мульды оседания дневной поверхности.

В целом результаты моделирования не противоречат существующим представлениям о процессах сдвижения надугольной толщи, шахтным наблюдениям и подтверждают основные положения разработанного механизма взаимодействия кровли с механизированной крепью для условий шахт Западного Донбасса.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методология проведения мониторинга высоконагруженных лав, которая позволила произвести шахтные исследования с учетом разделения тенденций влияния геологической среды, скорости подвигания углевыемочной машины и ширины захвата ее исполнительного органа.

2. Анализ результатов измерения давления в гидростойках секций крепи в процессе оценки влияния геологической среды установил следующее:

- неоднозначность влияния структуры основной кровли накладывается на неоднозначность влияния глубины размещения лавы, которое можно оценить как несущественное в плане формирования нагрузки на крепь (рост среднего давления в гидростойках до 4,5-6% при увеличении глубины разработки на 22-27%); это обусловлено тем, что нагрузка на крепь определяется объемом пород внутри контура свода естественного равновесия над крепью, а не весом всей надугольной толщи;

- на участках выемочного столба, где в срединной или верхней части основной кровли размещаются мощные слои (3,5-4,0 м и более) наблюдаются возмущения давления в гидростойках, что обусловлено зависанием породных консолей определенной длины; после их обрушения нагрузка на крепь падает ниже среднего значения; такие участки требуют повышенного внимания в части развития стабильно высокой скорости подвигания очистного забоя и недопущения его длительных остановок;

- на участках средне- и тонкослоистой структуры основной кровли проявлений ее посадки не зафиксировано, а величина среднего давления несколько выше, чем для участков с мощными слоями за исключением момента перед посадкой основной кровли.

3. При высокой скорости подачи и малой ширине захвата стругового исполнительного органа волна напряжений в зоне его работы несущественно сказывается на изменении давления в гидростойках, а, следовательно, и на увеличении нагрузки на секции крепи; этот факт стабильно проявляется в широком диапазоне изменения геомеханических и технологических факторов; исключение составляют недоминирующие условия периода посадки основной кровли, представленной отчасти мощными слоями; здесь зафиксировано превышение давления до 10-12% на коротком участке длиной до 12 м (до 8 секций) и только у незадвинутых к груди забоя секций.

4. Для обоснованного и достоверного разделения влияния отдельных технологических параметров на развитие нагрузки на механизированную крепь наиболее целесообразно использовать численные методы компьютерного моделирования, позволяющие варьировать указанные параметры в широком диапазоне изменения. Поэтому разработана и обоснована компьютерная модель для расчета НДС геомеханической системы в районе лавы и в качестве примера приведен расчет и анализ вертикальных напряжений, который показал, что вблизи забоя формируется значительное опорное давление, увеличивающееся в зоне работы исполнительного органа комбайна в несколько раз (в отличие от струга) по отношению к среднему по длине лавы. Следовательно, при ширине захвата 0,7 м наблюдается интенсивная волна напряжений, которую необходимо учитывать при работе механизированного комплекса.

## **12. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИТУАЦИЙ ПОСАДКИ НА «ЖЕСТКУЮ БАЗУ» КОМПЛЕКСА 1МКД-80**

### **12.1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА**

539-я лава длиной 180 м отрабатывает пласт  $C_5$  в третьем блоке ПСП «Шахта «Самарская». Лава подготовлена с откаточного штрека блока №3 выработками 539 сборного и 539 бортового штреков, последний повторно используется после отработки 537-й лавы. Со стороны 539 сборного штрека лава находится в нетронutom массиве, со стороны 539 бортового штрека лава граничит с выработанным пространством 537 лавы. Пласт в отрабатываемых пределах имеет волнистое залегание мощностью 0,4-1,01 м, средняя мощность 0,88 м. Средняя вынимаемая мощность пласта составляет 1,05 м и обеспечивается дополнительной присечкой пород почвы на величину до 20 см. Крепость угля  $f = 4 - 5$  по шкале проф. М.М. Протоdjяконова. Основная кровля в месте работы лавы представлена переслаиванием аргиллитов и алевролитов с подчиненным значением угольных пропластков; непосредственная кровля – аргиллит крепостью 2,2-2,5; непосредственная почва – аргиллит комковатой текстуры крепостью 1,3-1,5.

На момент обследования отжима угольного пласта по груди забоя не наблюдается. Породы непосредственной кровли разрушены с образованием сводов высотой 0,3-1,8 м. В кровле лавы над перекрытиями секций крепи наблюдаются трещины, параллельные груди забоя с шагом, равным величине захвата комбайна и проседанием до 0,3 м; наблюдаются явные признаки посадки основной кровли.

Лава оснащена механизированным комплексом 1МКД-80 с углевыемочным комбайном КА-200.

### **12.2. АНАЛИЗ ЯВЛЕНИЙ И ФАКТОВ, СВЯЗАННЫХ С ПОСАДКОЙ НА «ЖЕСТКУЮ БАЗУ» КОМПЛЕКСА 1МКД-80**

Инженерно-техническим персоналом шахты установлен ряд особенностей проявлений горного давления в процессе отработки выемочного участка 539 лавой, связанных с периодичностью посадки основной кровли и двумя аварийными ситуациями посадки на «жесткую базу» комплекса 1МКД-80. Сущность этих особенностей заключается в следующем.

*Во-первых*, при посадке основной кровли формируется нагрузка, приближающаяся к величине несущей способности секции механизированной кре-

пи, о чем свидетельствует задвижка штоков гидростоек до минимально допустимого уровня остающихся «зеркал» поверхности высотой 50-70 мм по заднему ряду стоек и 10-30 мм по переднему ряду стоек. В то же время, отдельные визуальные наблюдения указывают на развитие зоны обрушения высотой до 5-7 м, вес пород внутри которой составляет  $120-190 \text{ кН/м}^2$  и в 2,6-4,2 раза меньше несущей способности крепи 1КД-80, которая по технической характеристике комплекса составляет  $500 \text{ кН/м}^2$ .

*Во-вторых*, стабильно проявляется картина преимущественного нагружения переднего ряда стоек секций как при посадке основной кровли, так и при двух аварийных ситуациях посадки кровли на «жесткую базу» механизированного комплекса. Об этом свидетельствуют визуальные наблюдения прогиба перекрытий секций в районе его шарнирного соединения с консолью, а также повсеместное уменьшение (вплоть до нуля) высоты «зеркал» поверхности штоков в переднем ряду стоек по сравнению с задним рядом стоек. Такое поведение секций механизированной крепи указывает на формирование косонаправленной на забой нагрузки со стороны опускающейся кровли с концентрацией в районе переднего ряда стоек.

*В-третьих*, в бортовом и сборном штреках деревянные стойки органной крепи наклонены на забой в местах посадки основной кровли. Это также указывает на проявление косонаправленной нагрузки в сторону груди забоя в районе сопряжения лавы со штреками как в действующей 539 лаве, так и в ранее отработанной 537 лаве.

*В-четвертых*, отмечается относительно легкий процесс восстановления секций механизированной крепи в рабочее состояние (съем с «жесткой базы») после аварийных посадок. Это может служить косвенным доказательством того, что высота обрушения основной кровли достаточно ограничена и после разборки породы над перекрытиями секций они относительно легко раздвигаются (хватает развиваемого усилия распора) в исходное положение.

*В-пятых*, наблюдается закономерность изменения водопритока:

- между посадками основной кровли (в том числе и после посадки крепи на «жесткую базу») водоприток относительно небольшой (на уровне  $3-5 \text{ м}^3/\text{час}$ ) в виде «капежа» воды, достаточно равномерном по всей длине лавы;

- перед посадкой основной кровли водоприток снижается до  $2 \text{ м}^3/\text{час}$  и менее;

- после посадки основной кровли водоприток восстанавливается до прежнего уровня  $3-5 \text{ м}^3/\text{час}$ ;

- после посадки на «жесткую базу» водоприток резко возрастает до  $40-50 \text{ м}^3/\text{час}$  и сосредоточен в районе сопряжения со сборным штреком.

*В-шестых*, посадка на «жесткую базу» регулярно начинается с верхних секций, расположенных у бортового штрека, что указывает на влияние выработанного пространства отработанной 537-й лавы.

### 12.3. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ

Существующие представления о послойном обрушении непосредственной и основной кровли угольного пласта не в состоянии объяснить в полной мере указанные выше факты и явления, а именно:

- почему при весе обрушающихся пород в 24-38% от несущей способности механизированной крепи происходит ее посадка на «жесткую базу»; при этом отсутствует зависание сколь-нибудь протяженных консолей слабых породных слоев основной кровли;

- в то же время, отмечается относительно других случаев пониженная трудоемкость и продолжительность восстановления рабочего состояния секций после посадки на «жесткую базу»;

- сложно объяснить причины формирования косонаправленной (на забой) нагрузки на передние ряды гидростоек секций и органной крепи выемочных штреков;

- также не ясен процесс регулярного снижения водопритока перед посадкой на «жесткую базу», учитываая обводненность кровли с резким увеличением водопритока в 10 и более раз после посадки.

Все возникающие вопросы указывают на то, что мы столкнулись с новым явлением в процессах сдвижения надугольной толщи слабых обводненных пород, которое требует обоснования и разработки новой геомеханической модели процесса, объясняющей весь комплекс выявленных фактов.

Согласно горно-геологическому прогнозу отработки 539 лавы на участке активизации проявлений горного давления, выразившейся в первой посадке на «жесткую базу», и на ближайшие 220-230 м нетронутого массива в основной и непосредственной кровле залегает аргиллит с периодическим частичным замещением алевролитом общей мощностью до 7,3 м. С учетом высокой вероятности обрушения пласта  $C_5^1$  в выработанном пространстве 539 лавы максимальная высота посадки основной кровли достигает 7,6 м, которая своим весом создает нагрузку на секции крепи 1КД-80. Структура пород надугольной толщи в пределах указанной высоты согласно горно-геологического прогноза следующая:

- ложная кровля мощностью 0,28-0,40 м представлена углистым аргиллитом с объемным весом 14,8 кН/м<sup>3</sup>;

- непосредственная кровля – аргиллит (с частичным замещением алевролитом на отдельных участках) мощностью до 3,0 м и объемным весом 25,0-26,6 кН/м<sup>3</sup>;

- основная кровля – аргиллит (также с частичным замещением алевролитом) мощностью до 4,3 м и объемным весом 25,0-26,6 кН/м<sup>3</sup>;

- пласт  $C_5^1$  замещается углистым аргиллитом мощностью 0,25 м с объемным весом 14,8 кН/м<sup>3</sup>.

Тогда максимальное гидростатическое давление столба пород обрушающейся надугольной толщи не превышает:

$$\sigma_y^{max} = (0,35 + 0,25)14,8 + (7,6 - 0,35 - 0,25)25,8 = 189,5 \text{ кН/м}^2, \quad (12.1)$$

что составляет около 38% от несущей способности крепи 1КД-80. Эти данные соответствуют также результатам анализа состояния механизированной крепи.

Согласно существующим представлениям о сдвигении пород надугольной толщи в выработанное пространство, этот процесс разделяется на две зоны (в пределах интересующей нас высоты): зона беспорядочного обрушения ( $h_{об}$ ) и зона шарнирно-блокового сдвижения ( $h_{ш}$ ). Высота зоны обрушения ( $h_{об}$ ) определяется из условия подпора опускающихся пород основной кровли разрыхляющимися в объеме породами ложной, непосредственной и частично основной кровли:

$$h_{об} = \frac{m - h_c}{k_p - 1} \approx 1,6 \dots 2,6 \text{ м}, \quad (12.2)$$

где  $m = 0,98 \dots 1,05 \text{ м}$  – фактическая вынимаемая мощность пласта;

$h_c = (0,5 \dots 0,6)m$  – величина свободного прогиба (без обрушения) породных слоев основной кровли;

$k_p = 1,2 \dots 1,25$  – коэффициент разрыхления слабых глинистых сланцев при вынимаемой мощности пласта в районе 1 м.

Тогда высота зоны шарнирно-блокового сдвижения  $h_{ш}$  составит:

$$h_{ш} = 7,6 - h_{об} = 5 \dots 6 \text{ м}, \quad (12.3)$$

в пределах которой по плоскостям ослаблений возможно расслоение основной кровли на несколько породных слоев.

Эти данные в целом соответствуют наблюдениям и результатам исследований процессов сдвижения надугольной толщи на пологих пластах Донбасса, а сама схема приведена на рис. 12.1. Здесь сплошными линиями отражены эпюры вертикального горного давления  $\sigma_y(\gamma H)$  от послойного оседания пород основной кровли, которые позади очистного забоя опускаются на разрушенные породы так называемой зоны беспорядочного обрушения. Высокая податливость слоев аргиллита или алевролита (по причинам низкого модуля деформации, тонкослоистой структуры, интенсивной квиважной трещиноватости и обводненности) не допускает сколько-нибудь существенной длины зависающих над выработанным пространством консолей, а обеспечивает их плавный изгиб и опускание на обрушенные породы на ограниченном участке позади секции крепи. Поэтому, традиционная схема послой-

ного распределения горного давления  $\sigma_y(\gamma H)$  от веса опускающихся пород отличается для рассматриваемых условий только малым внутренним углом ( $\beta = 10...15^\circ$ ) наклона плоскостей полных сдвижений (штрихпунктирная линия) над очистным забоем и позади секций крепи; остальные характеристики схемы сдвижения неизменны:

- впереди забоя образуется область опорного давления от нежесткого защемления опускающихся пород слоев;
- над очистным забоем эпюра  $\sigma_y(\gamma H)$  снижается по плоскостям напластований ввиду отслоения и преимущественного опускания нижележащих слоев;
- позади очистного забоя на примыкающей длине пролета слоев их контакт друг с другом исчезает по причине раскрытия полостей и взаимное давление друг на друга прекращается;
- при опускании слоев на разрушенные породы в выработан пространстве горное давление  $\sigma_y(\gamma H)$  монотонно возрастает до начальной величины  $\gamma H$ .

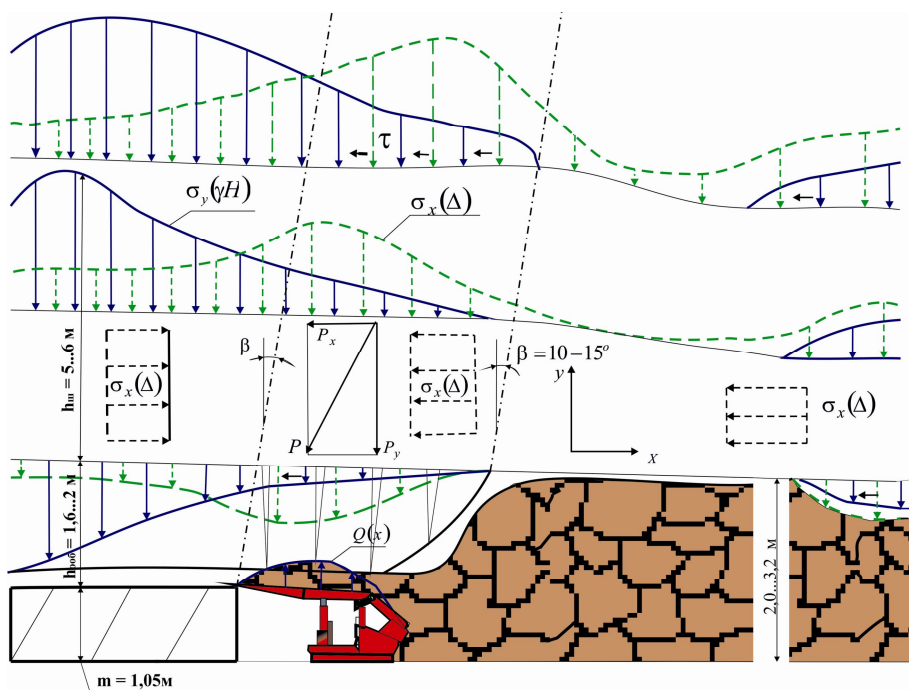


Рис. 12.1. Схема сдвижения кровли пласта с учетом ее водонасыщения



Описанная традиционная схема процесса сдвижения не в состоянии объяснить причины посадки крепи на «жесткую базу», так как вес отслоившихся пород в несколько раз меньше ее несущей способности. На наш взгляд, изучение нового явления многократного увеличения горного давления с изменением его вектора в сторону забоя следует искать в особенностях строения и свойств углевмещающей толщи:

- *во-первых*, отсутствует сколь-нибудь существенное зависание консолей породных слоев основной кровли по причине их низких прочностных характеристик, особенно, в водонасыщенном состоянии;

- *во-вторых*, в кровле пласта  $C_5$  размещается целый ряд водоносных маломощных угольных пластов;

- *в-третьих*, непосредственную и основную кровлю составляют глинистые породы, склонные к размоканию и увеличению в объеме («набуханию»), а обширному распространению этого процесса способствует весьма интенсивная трещиноватость – от 5-8 до 10-17 трещин на 1 п.м по данным горно-геологического прогноза.

Таким образом, на геостатическое горное давление  $\sigma_y(\gamma H)$  накладывается дополнительная составляющая  $\sigma_y(\Delta)$  от «набухания» (относительное увеличение объема обозначим  $\Delta$ , что тождественно объемной деформации пород) водонасыщенных аргиллитов и алевролитов непосредственной и основной кровли, которая на рис. 12.1 показана пунктирной линией, отражающей следующие особенности:

- *впереди лавы* прогнозируется стабильно равномерное вертикальное давление  $\sigma_y(\Delta)$ , обусловленное условиями «стесненного» деформирования породы с ограничением перемещений ее увеличивающегося объема в каком-либо направлении пространства; при этом возникают также дополнительные горизонтальные напряжения  $\sigma_x(\Delta)$ , которые способствуют частичному закрытию трещин (смыкание их берегов), что ограничивает водоприток и степень «набухания» пород кровли;

- *над рабочим пространством лавы* происходит изгиб слоев кровли и некоторое раскрытие трещин, что увеличивает водоприток, объем «набухающих» пород и давление расширяющейся во все стороны породы; этому сопротивляются: по горизонтали – нетронутый массив впереди лавы, а со стороны выработанного пространства обрушенные породы и силы трения  $\tau$  по плоскостям напластований (возникают от действий вертикального горного давления); по вертикали – вышележащие породы кровли и только в направлении рабочего пространства лавы перемещению пород препятствует только крепь; сопротивление крепи в среднем на порядок меньше сил горного давления и процесс сдвижения по законам природы направляется в сторону самого слабого элемента геомеханической системы;

- *позади очистного забоя* дополнительные составляющие вертикального  $\sigma_y(\Delta)$  и горизонтального  $\sigma_x(\Delta)$  горного давления снижаются, так как появ-

ляется возможность многостороннего расширения «набухшей» породы: вверх – в раскрывшиеся полости расслоения породных слоев, вниз – в уплотняющиеся обрушенные породы, по горизонтали – более интенсивная вертикальная трещиноватость с частичным раскрытием трещин.

Легко видеть, что суммарное воздействие геостатического горного давления  $\sigma_y(\gamma H)$  и составляющей  $\sigma_y(\Delta)$  «набухания» водонасыщенных пород кровли значительно выше и в этой связи проведем обоснование данной концепции совместного воздействия геомеханических и гидродинамических процессов в свете явлений и фактов, установленных в 539 лаве и примыкающих участках шахтного поля.

Прежде всего, оценим порядок величин геостатического давления  $\sigma_y(\gamma H)$  и дополнительных напряжений  $\sigma_y(\Delta)$ ,  $\sigma_x(\Delta)$  от расширяющейся в объеме породы при ее водонасыщении. На рассматриваемом участке 539 лавы глубина горных работ составляет  $H = 160 \dots 180$  м и, принимая средневзвешенный объемный вес вышележащего массива  $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$ , получим вертикальное давление нетронутого массива:

$$\sigma_y = \gamma H = 4,0 \dots 4,5, \text{ МПа.} \quad (12.4)$$

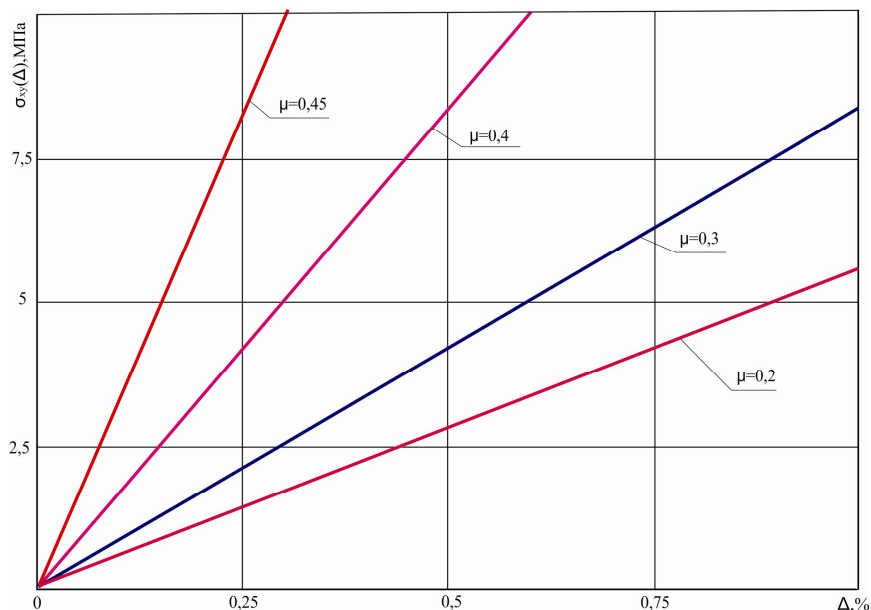
При «стесненных» условиях деформирования, то есть, невозможности расширения элементарного объема породы, размещенного в массиве, классическая линейная теория упругости дает связь между напряжениями  $\sigma_{y,x}(\Delta)$  и относительным увеличением объема  $\Delta$  при «набухании» водонасыщенных пород

$$\sigma_{y,x}(\Delta) = \frac{\Delta E}{3(1 - 2\mu)}, \quad (12.5)$$

где  $\Delta$  – относительное увеличение объема при водонасыщении;

$E$  и  $\mu$  – модуль деформации и коэффициент Пуассона породы.

Для наглядности по формуле (12.5) построены графики функции  $\sigma_{y,x}(\Delta)$  при  $E = 10^3$  МПа (рис. 12.2); здесь заведомо принят пониженный в несколько раз модуль деформации аргиллитов и алевролитов для учета влияния их водонасыщения. Как видим, дополнительные напряжения  $\sigma_{y,x}(\Delta)$  являются величинами одного порядка с геостатическим давлением, а, если учесть, что при размокании аргиллитов и алевролитов увеличиваются их пластические свойства (коэффициент  $\mu$  возрастает) и объемное расширение может составить несколько процентов, то формируется новый, достаточно высокий, уровень горного давления, многократно превышающий геостатическое  $\gamma H$ .



**Рис. 12.2. Связь напряжений  $\sigma_{y,x}(\Delta)$  стесненного деформирования при водонасыщении аргиллита (алевролита) с его относительным увеличением объема  $\Delta$  при разных значениях коэффициента Пуассона  $\mu$**

Данный результат является первым подтверждением того, что вполне реально формирование нагрузок на крепь, многократно превышающей вес пород внутри зоны обрушения при посадке основной кровли. Безусловно, «стесненные» условия «набухания» водонасыщенного аргиллита идеализированы, но если оставить только малую долю этого давления в десятки МПа, то она все равно сравнима с несущей способностью крепи, составляющей 0,5 МПа. Для раскрытия других фактов процесса сдвижения надугольной толщи рассмотрено явление «набухания» пород при подвигании очистного забоя (по координате  $X$  восстания пласта), которое схематически показано на рис. 12.3. Линия 1 характеризует развитие процесса «набухания» породного слоя кровли по мере подвигания очистного забоя.

Термин «развитие» понимается в том смысле, что увеличение относительного объема  $\Delta$  происходит, во-первых, во времени, а, во-вторых, – с увеличением водонасыщенности слоя, которая растет в промежутке времени между посадками основной кровли. Так, впереди лавы в зоне опорного давления повышенные вертикальные  $\sigma_y$  и горизонтальные  $\sigma_x$  напряжения в значительной степени закрывают берега трещин, уменьшая водопиток, а, следовательно, и величину «набухания» глинистых пород; над очистным забоем и позади него трещины раскрываются вследствие прогиба и оседания породных

слоев – водоприток и «набухание» породы увеличивается и все это происходит во времени воздействия воды в процессе подвигания забоя на шаг  $L$  обрушения основной кровли; так что по координате  $X$  интенсификация «набухания» возрастает нелинейно.

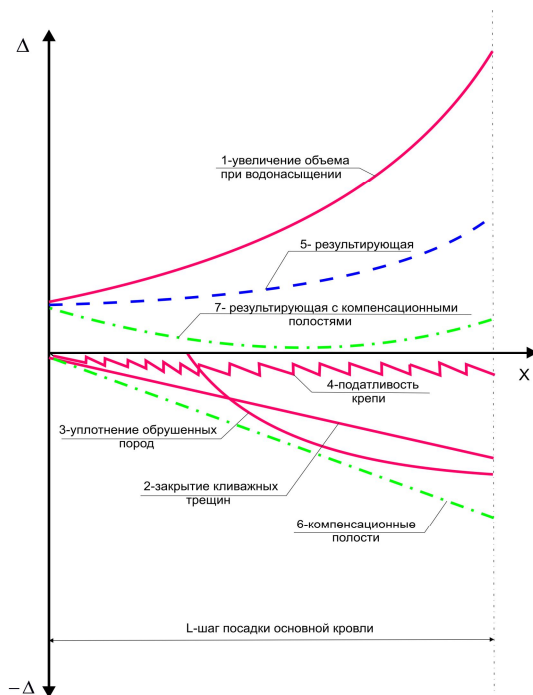
Но, присутствуют факторы, частично компенсирующие увеличение объема водонасыщенных пород кровли, к числу которых относятся:

- закрытие кливажных и техногенных (в процессе изгиба) трещин в породном слое, когда объем свободных полостей растет примерно пропорционально длине его пролета, то есть, линейно с расстоянием  $X$  отхода лавы (линия 2 на рис. 12.3);

- позади лавы обрушенные породы уплотняются под воздействием горного давления, но по мере их усадки растет сопротивление; как показывают исследования свойств обрушенных пород Западного Донбасса, их уплотнение практически прекращается (линия 3 на рис. 12.3) при нагрузке  $\sigma_y = 10...12$  МПа, то есть, в несколько раз превышающей геостатическое давление всех вышележащих пород, а при  $\sigma_y = \gamma H$  усадка пород зоны беспорядочного обрушения прекращается гораздо раньше;

- также присутствует фактор податливости секций крепи (линия 4 на рис. 12.3), но он несущественно влияет на компенсацию «набухания» кровли, так как при ритмичной работе комплекса он постоянно «входит в массив», а возможное некоторое проседание непосредственной кровли легко компенсируется регулированием вынимаемой мощности пласта.

Результат развития «набухания» породных слоев кровли и действия компенсирующих факторов выражен в результирующей линии 5 (см. рис. 12.3), особенностью которой заключается в том, что по мере отхода забоя лавы от предыдущей посадки основной кровли рост излишнего объема водонасыщенных пород происходит медленно, а при приближении забоя к следующей по-



**Рис. 12.3. Качественные закономерности изменения по мере отхода  $X$  лавы составляющих увеличения и компенсации объемов пород кровли при их водонасыщении**

садке основной кровли действие компенсирующих факторов ослабевает и происходит интенсивный рост объема водонасыщенной породы. Это способствует активному росту составляющих  $\sigma_y(\Delta)$  и  $\sigma_x(\Delta)$  горного давления, обусловленных обводнением кровли (рис. 12.4). В то же время, геостатическая составляющая  $\sigma_y(\gamma H)$ , напротив, выполаживается с увеличением отхода лавы, так как основная часть пролета слоев ложится на обрушенные породы. Поэтому, если в начале отхода лавы от предыдущей посадки основной кровли нагрузку на крепь формирует преимущественно геостатическое давление  $\sigma_y(\gamma H)$ , то при подходе лавы к следующей посадке главной является составляющая  $\sigma_y(\Delta)$  «набухания» водонасыщенных пород (см. рис. 12.4). В сумме составляющие  $\sigma_y(\gamma H)$  и  $\sigma_y(\Delta)$  могут превысить несущую способность крепи 1КД-80, что объясняет причину ее посадки на «жесткую базу».

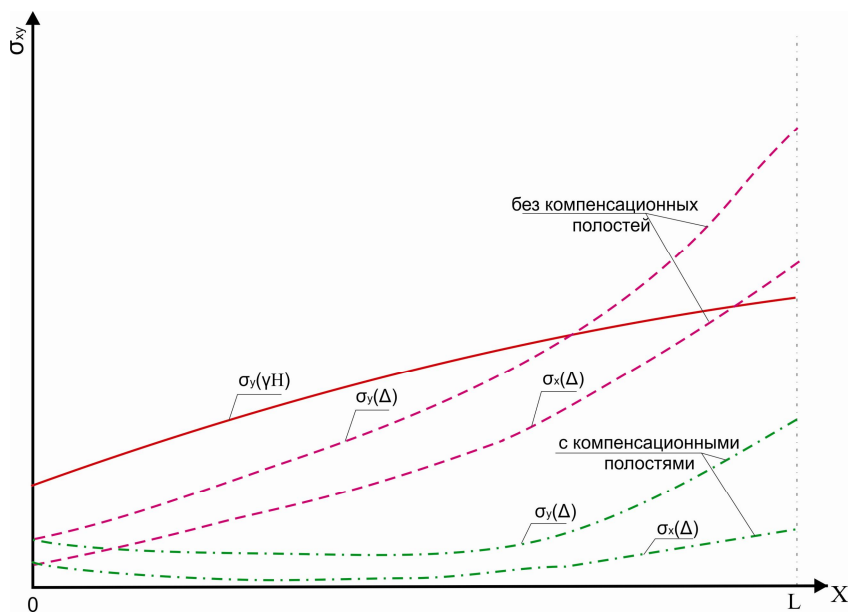


Рис. 12.4. Качественные закономерности изменения составляющих горного давления  $\sigma_{xy}$  по мере отхода лавы

В этой же плоскости лежит объяснение и остальных факторов и явлений, наблюдаемых в 539 лаве, для чего на рис. 12. 5 приведена поясняющая схема.

Периодичность изменения водопритока при посадке основной кровли, особенно, когда она сопровождается посадкой крепи на «жесткую базу», объясняется так. Стабилизация водопритока на уровне 3-5 м<sup>3</sup>/час после от-

хода лавы от предыдущей посадки обусловлена некоторым раскрытием трещин при изгибе и оседании слоев кровли позади лавы; в этот период «набухание» водонасыщенных пород в значительной степени компенсируется указанными ранее факторами и горизонтальные напряжения  $\sigma_x(\Delta)$  недостаточны для закрытия трещин.

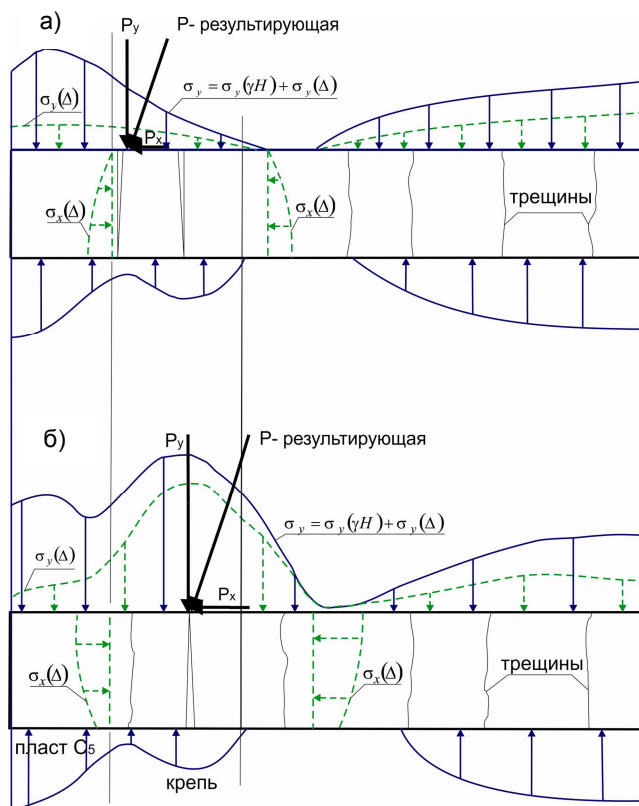


Рис. 12.5. Схема нагружения слоя основной кровли: а) после предыдущей посадки основной кровли; б) перед посадкой основной кровли

Перед посадкой основной кровли резко возрастает напряженность пород над лавой, в том числе и горизонтальных напряжений  $\sigma_x(\Delta)$ , которые частично закрывают трещины в основной кровле над лавой и по этой причине водопиток снижается до 2 м<sup>3</sup>/час и менее. При обрушении основной кровли, сопровождающегося посадкой на «жесткую базу», скопившаяся вода проникает по обширным трещинам и разломам с резким увеличением водопитока до 40-50 м<sup>3</sup>/час.

Косонаправленный на забой вектор горного давления в период посадки основной кровли, особенно, при посадке комплекса на «жесткую базу», обусловлен совместным действием концентраций вертикальных  $\sigma_y(\Delta)$  и горизонтальных  $\sigma_x(\Delta)$  напряжений в кровле пласта (см. рис. 12.1 и рис.12.5) над лавой. Каждый породный слой основной кровли находится под действием высоких сжимающих горизонтальных напряжений  $\sigma_x(\Delta)$  и может потерять устойчивость в классическом понимании продольной устойчивости плиты; ее из равновесного состояния выводит концентрация вертикальной нагрузки  $\sigma_y(\Delta)$  и прогиб плиты направлен по результирующей горного давления, примерно совпадающей с расположением переднего ряда стоек крепи.

Относительно облегченный процесс восстановления рабочего состояния секций крепи обусловлен следующим. Посадка на «жесткую базу» сопровождается определенной разгрузкой кровли от напряжений  $\sigma_y(\Delta)$  и  $\sigma_x(\Delta)$ ; при некотором разбурировании обрушенных пород над секцией появляются дополнительные полости, компенсирующие «набухание» породы и составляющие  $\sigma_y(\Delta)$  и  $\sigma_x(\Delta)$  практически исчезают. Остается только геостатическая составляющая горного давления  $\sigma_y(\gamma H)$ , которая (как указывалось ранее) гораздо меньше не только несущей способности крепи, но и усилий распора секции и она может без существенных затруднений принять исходное рабочее положение поддержания кровли с необходимыми зазорами для прохода комбайна и передвижки секций.

В целом, приведенное обоснование нового явления в геомеханике сдвижений надугольной толщи является отправной точкой для проведения комплекса шахтных наблюдений, лабораторных исследований на моделях из эквивалентных материалов и компьютерного моделирования процесса с целью выработки рекомендаций по безаварийной отработке пологих угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

## **12.4. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВОДА ВОДЫ ДРЕНАЖНОЙ ВЫРАБОТКОЙ**

### **12.4.1. ОБОСНОВАНИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОСТОЯНИЯ МАССИВА ДРЕНАЖНОГО ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ШТРЕКА**

Объектом исследований является дренажная выработка, например, вентиляционный штрек, пройденный в почве пласта  $C_5$  ПСП «Шахта «Самарская».

Предметом исследований является расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) пород почвы пласта  $C_5$  в окрестности штрека и его крепи, названной для краткости системой «массив-лава-штрек».

Основная цель исследований состоит в прогнозной оценке состояния дренажного вентиляционного штрека на предмет его устойчивости при прохождении над ним очистного забоя и уточнении правильности параметров его размещения и паспорта крепления. Такая оценка произведена на основе моделирования геомеханических процессов с помощью современных компьютерных программ, предназначенных для такого рода исследований.

Структура массива выбрана в районе размещения дренажного вентиляционного штрека, а ее компьютерная модель приведена на рис. 12.6.

Механические свойства каждой литологической разности в исследуемой структуре взяты из данных геологической характеристики породного массива по шахтному полю и работ [125-127], и сведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1

**МОДЕЛИРУЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД**

№ п/п	Тип породы	Сопротивление сжатию, $\sigma_{сж}$ , МПа	Сопротивление растяжению, $\sigma_p$ , МПа	Модуль деформации, $E$ , МПа
1	Уголь	40,0	2,8	$0,3 \cdot 10^4$
2	Аргиллит	18,8	1,5	$0,2 \cdot 10^4$
3	Алевролит	13,5	1,7	$0,4 \cdot 10^4$
4	Песчаник	38,4	3,2	$2,5 \cdot 10^4$
5	Уголь	40,0	2,8	$0,35 \cdot 10^4$
6	Аргиллит	18,8	1,5	$0,2 \cdot 10^4$
7	Алевролит	13,5	1,7	$0,4 \cdot 10^4$
8	Уголь	40,0	2,8	$0,35 \cdot 10^4$
9	Аргиллит	18,8	1,5	$0,2 \cdot 10^4$
10	Алевролит	12,3	1,4	$0,3 \cdot 10^4$
11	Угольный пласт $C_5$	49,6	3,1	$0,4 \cdot 10^4$
12	Аргиллит	19,6	1,6	$0,3 \cdot 10^4$
13	Алевролит	12,3	1,4	$0,3 \cdot 10^4$
14	Песчаник	23,0	2,2	$1,4 \cdot 10^4$
15	Уголь	49,6	3,1	$0,4 \cdot 10^4$
16	Аргиллит	13,4	1,2	$0,2 \cdot 10^4$

В итоге, по описанной структуре и механическим характеристикам моделируется состояние слоистого массива вокруг угольного пласта  $C_5$ .

По проекту шахты дренажный вентиляционный штрек проводится (под 549-й лавой уже сооружен) на расстоянии 8,7-9,2 м от почвы пласта  $C_5$ . Схема крепления штрека и вмещающие породы приведены на рис. 12.7. Принята крепь КШПУ-11,7 со следующими размерами: ширина выработки в проходке 4,78 м, ширина в свету 4,31 м; высота в проходке 3,66 м, высота в свету 3,44 м. Крепь КШПУ-11,7 изготовлена из СВП – 22(27) и установлена с шагом 1,0 м; борта и кровля выработки ограждены металлической решеткой.



Замки податливости рамной крепи моделировались по методике [87].

Анкерная крепь: количество анкеров в ряду – 9 (7 в кровлю выработки диаметром  $d = 22$  мм, длиной 2,4 м и 2 анкера в борта диаметром  $d = 22$  мм, длиной 2,4 м); шаг установки анкерных рядов 1,0 м.

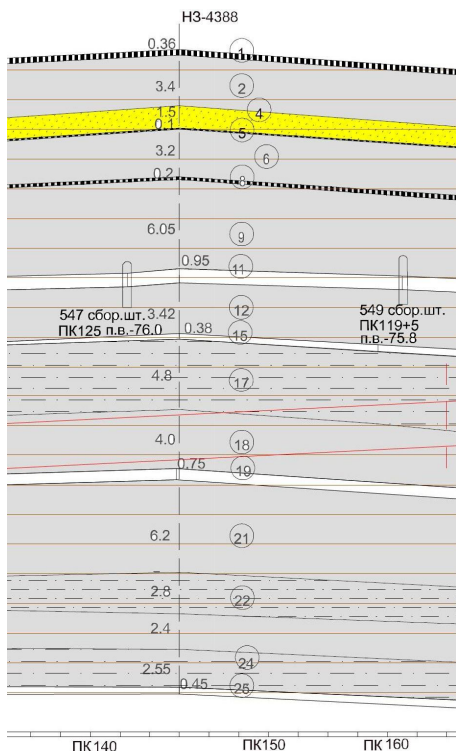
При проходе 549-й лавы над дренажным вентиляционным штреком его крепь усиливали следующим образом. Верхняки и стойки рамы КШПУ-11,7 связывают сборными балками из отрезков СВП-22 (27) длиной по 3,0 м. Под края верхняка устанавливаются деревянные стойки диаметром  $d = 22...24$  см, длиной 2,8 м.

Все указанные крепежные элементы полностью отражены в разработанной геомеханической модели. Профиль СВП отражен реальной геометрии с механическими характеристиками [135]: расчетный предел текучести стали Ст. 5  $\sigma_T = 270$  МПа, модуль упругости

$E = 21 \cdot 10^4$  МПа. Арматура анкеров имеет параметры:  $\sigma_T = 230$  МПа,

$E = 21 \cdot 10^4$  МПа. Деревянные стойки из сосны согласно [94] характеризуются пределом прочности на сжатие  $\sigma_{сж} = 40$  МПа и модулем деформации

$E = 1,4 \cdot 10^4$  МПа.



**Рис. 12.6. Модель структуры массива в районе дренажного вентиляционного штрека на участке 549-й лавы**

Сущность исследований заключалась в оценке влияния подхода 549-й лавы на НДС крепи дренажного вентиляционного штрека и окружающих его пород – ведь неясно, на каком расстоянии груди забоя от вертикальной оси штрека это влияние будет максимальным. Поэтому построены и рассчитаны три модели с разным положением груди забоя относительно вертикальной оси штрека (рис. 12.8):

- положение I – расстояние 14 м;
- положение II – расстояние 7 м;
- положение III – грудь забоя и вертикальная ось штрека совпадают.

Такая методология исследования позволила проследить нарастание горного давления на дренажный вентиляционный штрек по мере подхода очистного забоя 549-й лавы.

Остальные исходные параметры модели имеют следующие значения.

Согласно технической документации глубина разработки в районе дренажного вентиляционного штрека составляет  $H = 172$  м, что при средневзвешенном объемном весе пород  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup> определяет исходное вертикальное горное

давление  $\sigma_y = \gamma H = 4,3$  МПа. Горизонтальное горное давление определяется автоматически коэффициентом бокового распора из условия «симметрии».

Механизированная крепь серии КД-80 первого типоразмера имеет максимальную реакцию отпора на уровне  $P = 450...470$  кН/м<sup>2</sup>. При этом задвижку штоков гидростоек можно оценить на уровне 10 мм (в жестком режиме работы между передвижками секций) за счет сжатия рабочей жидкости, люфтов в соединениях и тому подобное. При вынимаемой мощности  $m = 1060$  мм относительная податливость секции составит

$$\varepsilon = \frac{10}{1060} = 9,4 \cdot 10^{-3}.$$

Тогда, если представить секцию однородным прямоугольником (см. рис. 12.8) его модуль деформации равен

$$E = \frac{P}{\varepsilon} = \frac{460 \text{ кПа}}{9,4 \cdot 10^{-3}} = 48,9 \approx 50 \text{ МПа}. \quad (12.6)$$

Таким образом, механизированная крепь наделяется механической характеристикой  $E = 50$  МПа, и при опускании кровли будет осуществлять соответствующее сопротивление – такая идеализация существенно стабилизирует вычислительный процесс.

Последними из неустановленных параметров, касающихся пород выработанного пространства, являются высота  $h$  зоны беспорядочного обрушения пород и их модуль деформации  $E$ . Высота зоны беспорядочного обрушения определяется по рекомендациям [91]

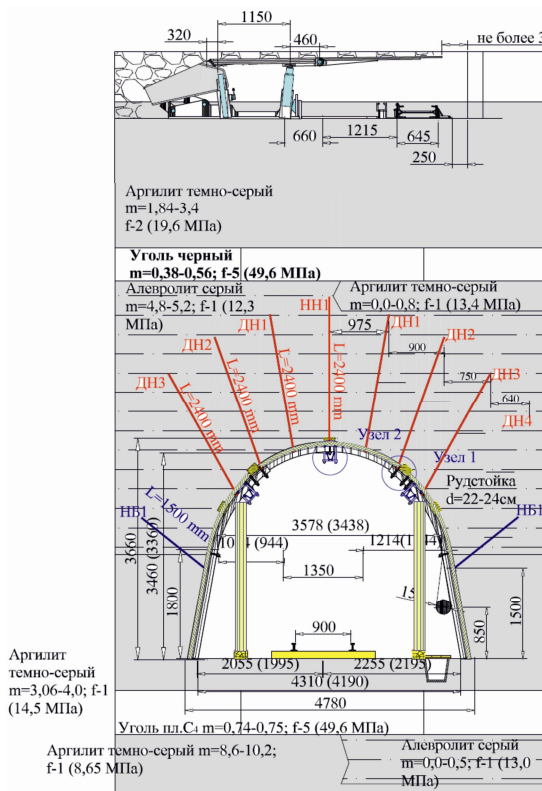


Рис. 12.7. Схема крепления дренажного вентиляционного штрека и его размещение относительно пласта  $C_6$

$$h = \frac{m - h_c}{k_p - 1}, \quad (12.7)$$

где  $m = 1,06$  м – вынимаемая мощность пласта;

$h_c = 0,6$  м – свободное опускание кровли;

$k_p = 1,2$  – коэффициент разрыхления слабых глинистых сланцев при вынимаемой мощности порядка 1,0 м.

Тогда  $h = 2,12$  м, что и заложено в модели.

Модуль деформации  $E$  обрушенных пород определен по данным экспериментальных исследований [134] для пород Западного Донбасса и составляет в среднем  $E = 3$  МПа.

Таким образом, определены все исходные параметры модели для расчета НДС системы «массив-лава-штрек».

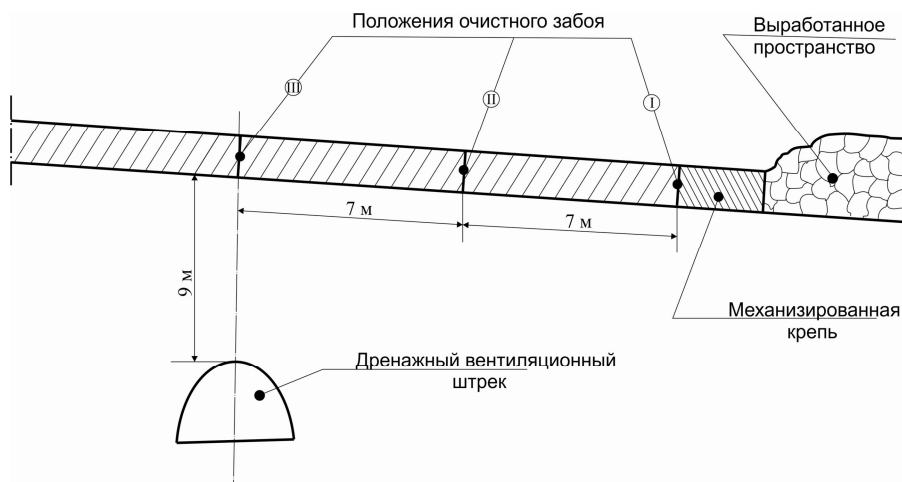


Рис. 12.8. Схема проведения расчета НДС при подходе лавы к дренажному вентиляционному штреку

#### 12.4.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общеизвестно, что впереди очистного забоя в кровле пласта образуется зона опорного давления, передвигающегося по мере перемещения лавы. Аналогичная зона опорного давления формируется и в почве пласта, но несколько иной формы (рис. 12.9): она имеет относительно ограниченные размеры впереди груди забоя, но вытянута в глубь почвы пласта. Изолинии кон-

центраций  $\frac{\sigma_y}{\gamma H}$  вертикального горного давления при трех положениях (I, II и III) груди забоя показывают высокую стабильность параметров зоны опорного давления в почве, что может служить косвенным подтверждением правильности наших расчетов.

Параметры концентрации вертикального горного давления охарактеризованы четырьмя изолиниями, последняя из которых  $\sigma_y = \gamma H$  указывает на границу зоны опорного давления, то есть область, за пределами которой влияние очистного забоя уже не ощущается.

Данные о размерах каждой области сведены в табл. 12.2.

Таблица 12.2

**РАЗМЕРЫ ОБЛАСТЕЙ С РАЗНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Коэффициент концентрации горного давления, $\frac{\sigma_y}{\gamma H}$	Длина области по восстанию, м	Глубина области в почву пласта, м
2,7-3,0	до 3,2	до 4,3
1,7-2,3	до 5,7	до 7,2
1,2-1,6	до 6,1	до 8,2

Из данных табл. 12.2, а также из рис. 12.9 следует вывод, что в исследованных горно-геологических условиях дренажный вентиляционный штрек следует размещать на глубине 8,3-8,5 м, где практически отсутствует влияние опорного давления  $\left(\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 1,0 \dots 1,1\right)$  со стороны очистного забоя. Тогда

приконтурные к штреку породы ведут себя как при поддержании одиночной выработки и только вмещающие породы определяют нагрузку на крепь штрека, что подтверждает целесообразность проведения дренажного вентиляционного штрека на глубине 8,7-9,2 м от почвы пласта  $C_5$ .

Когда штрек попадает в выработанное пространство 549 лавы, то разгрузка почвы пласта  $C_5$  наиболее активна на глубине до 3,4-3,7 м  $\left(\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0 \dots 0,33\right)$ . На

глубине 7,8-9,1 м вертикальное горное давление стабилизирует на уровне исходного  $\sigma_y = \gamma H$  и здесь не возникает каких-либо нарушений массива, связанных с прохождением очистного забоя. Нагрузка на крепь определяется исключительно механическими характеристиками боковых пород – большей частью штрек размещен в слабом алевролите с  $\sigma_{сжс} = 12,3$  МПа. Благодаря системе анкеров в кровле этот алевролит находится в устойчивом состоянии и верхняя рама недогружена. Следует отметить, что заглубленная часть анкеров попадает

в зону с концентрацией  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 1,7...2,3$ ; но даже в этом случае вертикальное горное давление составляет

$$\sigma_y = (1,7...2,3)\gamma H = 7,3...9,9 \text{ МПа},$$

что меньше сопротивления сжатию алевролита и анкера продолжают выполнять свои функции. Но, выше алевролита залегает угольный пласт  $C_4^3$ , который может являться водоносным горизонтом, обводняющим и разупрочняющим алевролит до 2 раз и более. Тогда кровля штрека становится неустойчивой и нагрузка на верхняк приведет к срабатыванию замков податливости. Этот процесс может не ограничиться величиной податливой крепи 300 мм – следовательно, необходимо возвести дополнительно крепь усиления, что и предусмотрено паспортом крепления штрека.

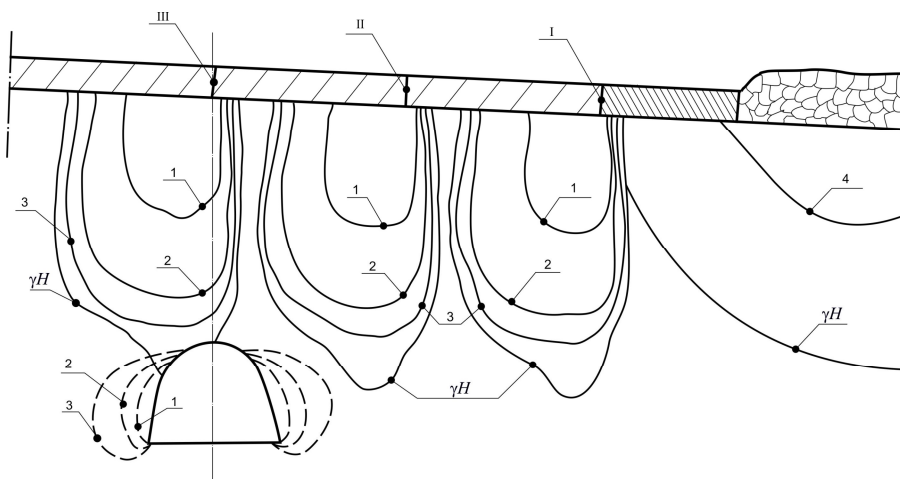


Рис. 12.9. Изолинии концентрации вертикального горного давления:

— от очистного забоя; от штрека; - - - от штрека

$$1 - \frac{\sigma_y}{\gamma H} = 2,7...3,0 ; 2 - \frac{\sigma_y}{\gamma H} = 1,7...2,3 ;$$

$$3 - \frac{\sigma_y}{\gamma H} = 1,2...1,6 ; 4 - \frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0...0,33$$

В случае отсутствия обводненности боковых пород напряженное состояние рамы и стоек усиления не вызывает опасений в плане устойчивости крепи. Более того, самым нагруженным элементом являются стойки рамной крепи, а верхняк рамы и особенно стойки крепи усиления существенно недогружены. Второй особенностью является формирование повышенного бокового

давления на стойки рамы. Для исключения их пластического изгиба рекомендуется соединить канатом боковые анкера со стойками рамной крепи.

При уменьшении расстояния между обрабатываемым пластом и расположенным в почве дренажным штреком прогнозируется следующая ситуация. *Во-первых*, повышение вертикального давления начинает ощущаться за 5,0-5,8 м до ближнего борта выработки, когда коэффициент концентрации

повышается до значения  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 1,1 \dots 1,4$ . При этом нагружаются в большей

степени стойки рамы и стойки крепи усиления со стороны надвигающегося очистного забоя, а несимметричность нагружения рамы снижает ее несущую способность. *Во-вторых*, при дальнейшем приближении очистного забоя исходная несимметричность нагружения крепи выравнивается, а максимальное горное давление формируется при отставании груди забоя на 2,8-3,3 м от вертикальной оси штрека. При этом вся выработка попадает в зону наиболее интенсивного горного давления, что также снижает устойчивость штрека.

## ВЫВОДЫ

1. В исследованных и аналогичным им горно-геологических условиях от проходящей лавы в почве пласта образуется зона опорного давления шириной по восстанию до 6,1 м и глубиной до 8,2 м.

2. Во избежание повышенного горного давления дренажный вентиляционный штрек рекомендуется размещать на расстоянии 8,3-8,5 м от почвы пласта. Тогда нагрузка на крепь определяется механическими свойствами боковых пород как для выработки вне зоны влияния очистных работ.

3. После прохода лавы в надработанном массиве пород почвы стабилизация горного давления на уровне исходного  $\gamma H$  происходит, примерно, на той же глубине, что и в зоне опорного давления. Поэтому рекомендации по рациональной глубине размещения дренажного вентиляционного штрека остаются прежними и соответствуют техническому решению, разработанному ПСП «Шахта «Самарская»».

4. При необводненных боковых породах крепь дренажного вентиляционного штрека находится в устойчивом состоянии с существенно недогруженными верхняком и стойками крепи усиления. В данной ситуации возможно исключить стойки усиления из схемы крепления штрека, а повышение сопротивления верхняка обеспечить за счет его соединения канатом с крайними анкерами, расположенными в районе замков податливости рамы.

5. На участках обводнения боковых пород со стороны вышележащего пласта  $C_4^3$  установка стоек усиления обязательна. Для противодействия повышенному боковому давлению рекомендуется соединить канатом стойки рамы с боковыми анкерами в единую грузонесущую конструкцию.

### 13. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Обобщение результатов исследований выполнено в трех взаимосвязанных направлениях:

- формирование рекомендаций по параметрам ведения очистных работ для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий на базе мониторинга работы струговой установки;
- расширение области использования рекомендаций на базе моделирования поведения углевлещающей толщи в окрестности очистных работ при технологических параметрах, отличающихся от таковых для струговой лавы;
- обоснование направлений дальнейших исследований по мониторингу работы разных очистных комплексов и системного многофакторного моделирования процессов формирования нагрузки на механизированную крепь для обобщения рекомендаций на широкий спектр горно-геологических и горнотехнических условий выемки угля на пологих пластах.

#### 13.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ СТРУГОВОЙ УСТАНОВКИ

В процессе мониторинга работы струговой установки анализировались показания давления  $P$  в гидростойках секций крепи очистного комплекса (как эквивалент действующей на них нагрузки) при различных сочетаниях геомеханических и технологических факторов, в результате чего установлено ряд закономерностей.

*Во-первых*, не выявлено каких-либо достаточно стабильных закономерностей изменения давления  $P$  по длине лавы; при этом была обработана информация по показаниям давления в гидростойках крепи при разных структурах кровли и глубине расположения лавы в пределах выемочного участка, переменных скоростях подвигания очистного забоя и времени его простоя. Колебания  $P$  как в большую, так и в меньшую стороны от средней величины возникали на различных участках по длине лавы и скорее всего обусловлены изменением структуры надугольной толщи (по длине лавы), а также степени обводненности, интенсивности трещиноватости и других геомеханических факторов, влияющих на устойчивость пород кровли. Таким образом, в исследованных горно-геологических условиях работы 161 струговой лавы ПСП «Шахта «Степная» не подтверждается классическое положение о преобладающей нагрузке на крепь в ее центральной части по отношению к концевым участкам лавы. В определенной мере этому способствует искривленная (выпуклая) форма забоя с его опережением в «массив»

центральной части по отношению к концевым участкам длины лавы, что как известно, повышает устойчивость породного обнажения в сравнении с прямолинейной формой забоя. В этой связи представляется перспективным изучение влияния формы очистного забоя (в плоскости напластования) на процесс формирования нагрузки на крепь по длине лавы и установление рациональной величины опережения забоя центральной части лавы в пределах конструктивных возможностей механизированных комплексов.

*Во-вторых*, выявлена стабильная закономерность формирования пониженной нагрузки на секции крепи, придвинутые к груди забоя в сравнении с незадвинутыми секциями. Она регулярно отличается вне зависимости от структуры надугольной толщи, глубины расположения лавы, скорости ее подвигания и времени простоя забоя. Установлено, что секции, расположенные на расстоянии  $\delta < 0,5$  м от груди забоя, воспринимают нагрузку в 65-80% от максимальной реакции отпора и практически повсеместно работают в жестком режиме сопротивления без перехода в режим податливости с сопутствующим уменьшением высоты раздвижки гидростоек и рабочего пространства лавы. Здесь четко проявляется влияние груди забоя, сдерживающего вертикальные опускания породных слоев кровли, что заложено в разработанном механизме сдвижения надугольной толщи и в геомеханической модели по описанию этого процесса.

Изложенная закономерность проявления горного давления полностью соответствует существующим представлениям и объективно действует вне зависимости от применяемого очистного оборудования. Для струговой лавы установлено численное значение изменения давления  $P$  в зависимости от положения  $\delta$  секции относительно груди забоя; эта закономерность близка к линейной и ее в первом приближении можно записать в виде

$$P = (270...280) + 180\delta, \text{ Бар} \quad (13.1)$$

где  $\delta$  – расстояние передней кромки консоли секции от груди забоя, м.

Линейность функции  $P(\delta)$  во многом объясняется относительно небольшим диапазоном изменения  $\delta$  (в пределах хода штока гидродомкрата передвижки секции) по отношению к длине устойчивого пролета слоев кровли, когда на ограниченном участке их изгиба можно принять в виде прямой линии. Тогда логично предположить, что и для других типов механизированных крепей (и очистных комплексов в целом) закономерность изменения нагрузки  $Q$  на секцию в зависимости от ее положения  $\delta$  относительно груди забоя будет близка к линейной, но с другими значениями давления, характерными для данной конструкции крепи и условий ее эксплуатации. В общем виде рост нагрузки на секцию определяется зависимостью

$$Q(\delta) = Q_{\min} + (Q_{\max} - Q_{\min}) \frac{\delta - \Delta}{\delta_{\Gamma}}, \quad (13.2)$$



где  $Q_{min}$  – величина нагрузки при полностью задвинутой к груди забоя ( $\delta = \Delta$ ) секции;

$Q_{max}$  – величина нагрузки при полностью выдвинутом гидродомкрате ( $\delta = \Delta + \delta_{\Gamma}$ ) перемещения секции;

$\Delta$  – зазор между передней кромкой консоли и забоем при полностью задвинутой секции;

$\delta_{\Gamma}$  – ход штока гидродомкрата передвижки секций.

В практическом плане учет данной закономерности нацеливает на выполнение операции задвижки всех секций при аварийной остановке лавы – тогда имеется резерв увеличения реакции крепи при росте на нее нагрузки в процессе простоя. Этот резерв составляет до 35% от максимальной реакции крепи и обеспечивает требуемую раздвижку гидростоек (до срабатывания предохранительных клапанов) на некоторое время остановки забоя. Операция по задвижке всех секций (в случае возникновения аварийной ситуации) не вызывает затруднений для большинства типов механизированных крепей; если система управления стругового комплекса не предусматривает данной операции, то ее необходимо дополнить указанной функцией по согласованию с фирмой – производителем оборудования.

*В-третьих*, установлена тенденция снижения давления  $P$  в гидростойках секций с увеличением среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя, которая наблюдается во всем зафиксированном диапазоне изменения  $V_c$  при отработке 161 струговой лавы вне зависимости от вариации геомеханических факторов. Закономерность связи  $P$  и  $V_c$  такова, что основная часть падения давления (снижения нагрузки на секции) происходит в интервале роста  $V_c = 2,5...8,0$  м/сут.; далее зависимость  $P(V_c)$  выполаживается и степень влияния  $V_c$  составляет всего 0,9-7,4% при разной структуре пород кровли вне зависимости от положения лавы по отношению к шагу посадки основной кровли. Безусловно, значения показаний давления изменяются в зависимости от геомеханических факторов и положения  $\delta$  секций; однако тенденция связи  $P$  и  $V_c$  остается стабильной и ее для условий мониторинга работы 161 струговой лавы можно представить в виде

$$P(V_c) = P_{min} + \frac{P_{max} - P_{min}}{0,4 + 0,15V_c^2}, \quad (13.3)$$

где  $P_{min}$  и  $P_{max}$  – минимальное и максимальное давление в гидростойках секций крепи при разных скоростях  $V_c$  подвигания очистного забоя.

Величина  $P_{min}$  и  $P_{max}$  зависит от геомеханических факторов (прежде всего, от структуры надугольной толщи и положения лавы относительно шага посадки основной кровли) и расстояния  $\delta$  секции до груди забоя. Кроме то-

го, следует учитывать, что наибольшее значение  $P_{max} = 450...460$  Бар определяется настройкой предохранительных клапанов гидростоек, а минимальное значение может быть меньше давления нагнетания  $P_n = 320$  Бар масляной станцией рабочей жидкости (начальный распор) в поршневую полость гидростоек и опускаться по данным измерений до 260-280 Бар.

Аналогично уравнению (13.3) записана функция  $Q(V_c)$  изменения нагрузки  $Q$  на крепь от среднесуточной скорости  $V_c$  подвигания очистного забоя, в которой учтена полученная ранее функция  $Q'(\delta)$  по уравнению (13.2). Здесь отражено влияние положения  $\delta$  секции безразмерной функцией  $\Phi(\delta)$  вида

$$\Phi(\delta) = \frac{Q'_{min}}{Q'_{max}} + \left(1 - \frac{Q'_{min}}{Q'_{max}}\right) \frac{\delta - \Delta}{\delta_{\Gamma}}, \quad (13.4)$$

в которой величины  $Q_{min,max}$  в уравнений (13.2) заменены на обозначения  $Q'_{min,max}$  во избежание неоднозначного их толкования, так как величины  $Q'_{min,max}$  характеризуют минимальную и максимальную нагрузку на крепь (в конкретной горно-геологической ситуации), обусловленную только разным значением параметра  $\delta$ . Тогда связь нагрузки  $Q(V_c, \delta)$  с технологическими параметрами очистных работ выражается уравнением

$$Q(V_c, \delta) = \left( Q_{min} + \frac{Q_{max} - Q_{min}}{0,4 + 0,15V_c^2} \right) \Phi(\delta). \quad (13.5)$$

Это выражение справедливо в условиях отработки выемочного участка, схожих с таковыми для 161 струговой лавы, при диапазоне изменения скорости подвигания очистного забоя  $V_c = 2...12$  м/сут. В иных горно-геологических и горнотехнических условиях выражение (13.5) следует корректировать по результатам мониторинга работы конкретного очистного оборудования на конкретном выемочном участке в совокупности с моделированием процессов сдвижения надугольной толщи в данных условиях ведения горных работ.

*В-четвертых*, уравнение (13.5) следует рассматривать в виде структурной основы, где количественные значения входящих параметров зависят также от геомеханических факторов, учитываемых поправочными коэффициентами. Здесь имеются следующие факты, установленные в процессе мониторинга работы 161-й струговой лавы:

- при крупно- и среднеслоистой структуре пород кровли в период, не связанный с ее посадкой, нагрузка на секции в среднем на 10-15% ниже, чем на участках выемочного столба с тонко- и среднеслоистой структурой кровли; при описании механизма сдвижения надугольной толщи этот факт был объяснен тем, что более мощные слои в период их устойчивого состояния пе-

редают часть своего веса на обрушенные нижележащие породы, а не целиком на крепь;

– в период, предшествующий посадке основной кровли с крупно – и среднеслоистой структурой, нагрузка на секции возрастает до 20% и на 5-10% превышает таковую при тонко- и среднеслоистой структуре кровли, которая характеризуется отсутствием или весьма слабым проявлением эффекта посадки основной кровли; зафиксированное явление также нашло отражение в разработанном механизме сдвижения надугольной толщи и обусловлено зависанием относительно протяженных породных консолей мощностью 3,0-5,7 м, формирующих повышенную нагрузку на механизированную крепь.

Приведенные результаты мониторинга, касающиеся влияния геомеханических факторов, автоматически учитываются в формуле (13.5) через параметры  $Q_{min,max}$  и  $Q'_{min,max}$ , которые изменяются в зависимости от структуры кровли и положения лавы относительно шага посадки. На перспективу создания единого обобщенного метода прогноза нагрузки на крепь целесообразно использовать какую-либо закономерность  $Q(V_c, \delta)$  в качестве базовой, например, зависимость для тонко- и среднеслоистой кровли; а учет изменения структуры кровли и возмущений горного давления в период ее посадки осуществлять при помощи поправочных коэффициентов. Например, по данным мониторинга работы 161 струговой лавы вполне обоснованным является введение поправочного коэффициента  $k_{СК}$  структуры кровли со следующими значениями:

- $k_{СК} = 1$  – для тонко- и среднеслоистой структуры;
- $k_{СК} = 0,85...0,9$  – для крупно- и среднеслоистой структуры пород кровли в период, не связанный с ее посадкой;
- $k_{СК} = 1,05...1,10$  – для крупно- и среднеслоистой структуры пород кровли перед ее посадкой.

Также на перспективу методом компьютерного моделирования необходимо детализировать закономерность (13.5) по параметрам мощности и механических характеристик каждой литологической разности непосредственной и основной кровли, что позволит повысить надежность прогнозирования нагрузки на механизированную крепь в различных горно-геологических условиях.

*В-пятых*, установлено, что в исследованных горно-геологических условиях изменение глубины размещения лавы (отработка ведется длинными столбами по восстанию пласта) от  $H = 440$  м до  $H = 340$  м малосущественно влияет на проявления горного давления. Даже при крупно- и среднеслоистой структуре основной кровли перед ее посадкой увеличение среднего давления в гидростойках составило всего 0,6% на всем диапазоне изменения  $H$ . Данный факт обусловлен известным геомеханическим явлением активного участия в процессе нагружения крепи только некоторого объема пород кровли, размеры

которого достаточно ограничены и изменяются в основном под влиянием структурных особенностей кровли, механических характеристик слагающих ее литотипов и технологических параметров ведения очистных работ.

*В-шестых*, зафиксированы стабильно проявляющиеся возмущения горного давления («всплеск» давления в гидростойках секций) в зоне работы стругового исполнительного органа, величина которого, однако, не превышает 10-12% от среднего значения. Такие малые отклонения «волны» горного давления объясняются, прежде всего, небольшой шириной захвата стругового исполнительного органа в диапазоне  $B = 50...70$  мм. Данная ширина уступа забоя вносит несущественные изменения в его выпуклую геометрию, вследствие чего значительного пригружения секций крепи в зоне работы стругового исполнительного органа не происходит. Однако, это не обозначает отсутствия «волны» горного давления в зоне работы углевыемочных машин других конструкций и учет данного явления должен производиться на перспективу как посредством шахтного мониторинга, так и компьютерного моделирования различных величин технологических параметров отработки пологих угольных пластов.

*В-седьмых*, при остановке очистного забоя стабильно проявляется закономерность нарастания нагрузки (давления в гидростойках) во времени  $t$  простоя. Установлено, что вне зависимости от геомеханических и технологических параметров наиболее интенсивный рост давления  $P$  происходит в первые 6 часов остановки забоя; в этот период увеличение давления составляет 70-91% от величины роста  $P$  за 11,5-13,5 часов простоя, когда определяется закономерность  $P(t)$ . Независимость качественной связи параметров  $P$  и  $t$  при работе стругового комплекса позволяет ее использовать для прогнозирования нарастания давления (при плановой остановке или аварийной ситуации) во всем диапазоне изменения геомеханических и технологических факторов. Данный вывод подтверждается также результатами исследований нарастания давления  $P(t)$  при разной скорости продвижения очистного забоя, предшествующей его остановке: здесь увеличение давления за первые 6 часов простоя составило 60-95% от общего прироста и вполне согласуется с закономерностями  $P(t)$  при воздействии иных геомеханических и технологических факторов. Таким образом, если функцию  $P(t)$

представить в относительном виде  $\frac{P(t)}{P_{min}}$ , то она будет достаточно стабиль-

на при различных сочетаниях геомеханических и технологических параметров. На базе данных мониторинга работы 161 струговой лавы получена следующая функция нарастания давления во времени простоя

$$F(t) = \frac{P(t)}{P_{min}} = \frac{P_{max}}{P_{min}} - \left( \frac{P_{max}}{P_{min}} - 1 \right) \exp(-0,28t), \quad (13.6)$$

где  $t$  – продолжительность остановки лавы, час.

Заменяя давление  $P$  в гидростойках на тождественный параметр – нагрузка  $Q$  на секцию, получим функцию  $\frac{Q(t)}{Q_{min}}$  нарастания относительной нагрузки во времени простоя лавы

$$F(t) = \frac{Q(t)}{Q_{min}} = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} - \left( \frac{Q_{max}}{Q_{min}} - 1 \right) \exp(-0,28t). \quad (13.7)$$

С учетом выражения (13.7) связь нагрузки  $Q(V_c, \delta, t)$  с технологическими параметрами очистных работ, на примере 161 струговой лавы (и схожих условиях) определяется уравнением

$$Q(V_c, \delta, t) = \left( Q_{min} + \frac{Q_{max} - Q_{min}}{0,4 + 0,15V_c^2} \right) \Phi(\delta) F(t). \quad (13.8)$$

В первом приближении для предварительной оценки нагрузки на механизированную крепь струговой лавы допускается принимать  $Q_{max} = Q'_{max} = 620 \dots 650$  кПа;  $Q_{min} = Q'_{min} = 400 \dots 420$  кПа.

Для расширения области достоверного использования закономерности (13.8) необходимо (в рамках разработанной методологии) провести комплексные исследования по шахтному мониторингу работы очистного оборудования в сочетании с компьютерным моделированием геомеханических и технологических условий отработки пологих угольных пластов в сложных горно-геологических условиях.

Тем не менее, по результатам мониторинга работы струговой лавы обосновано ряд практических рекомендаций, касающихся снижения нагрузки на механизированную крепь и, соответственно, вероятности посадки крепи очистного комплекса на «жесткую базу» для условий, аналогичных исследованным:

- наиболее интенсивное снижение нагрузки на крепь имеет место при среднесуточной скорости подвигания очистного забоя не менее 7,5-8,0 м/сут., которую рекомендуется поддерживать для создания резерва реакции отпора крепи порядка 20-30%;

- повышенная нагрузка на секции формируется перед посадкой основной кровли крупно- и среднеслоистой структуры, поэтому на отмеченных участках по длине выемочного столба рекомендуется поддерживать указанную выше среднесуточную скорость подвигания очистного забоя;

- наиболее опасная ситуация активного развития нагрузки на крепь возникает при остановке забоя на участках с крупно – и среднеслоистой структурой в период, предшествующий ее посадке; здесь допускается остановка забоя продолжительностью до 6 часов при предшествующей среднесуточ-

ной скорости подвигания  $V \geq 7,5...8,0$  м/сут. и продолжительностью до 12 часов при  $V_c \geq 9...10$  м/сут.;

- при невыполнении вышеизложенного условия в случае остановки забоя продолжительностью более 6 часов рекомендуется задвинуть секции к груди забоя; эта операция обеспечивает резерв реакции отпора крепи до 35% и сохранение на некоторое время требуемой высоты раздвижки гидростоек;

- при тонко- и среднеслоистой структуре основной кровли безопасное (с точки зрения посадки крепи очистного комплекса на «жесткую базу») время остановки составляет до 12 часов при предшествующей скорости подвигания не менее 5 м/сут.; в случае  $V_c < 5$  м/сут. и продолжительности остановки более 6 часов рекомендуется выполнить операцию задвижки всех секций к груди забоя; при других типах исполнительных органов углевыемочных машин следует в каждом конкретном случае решать вопрос о возможности прохода исполнительного органа под задвинутыми секциями или уменьшении вынимаемой мощности пласта на несколько проходов комбайна.

### 13.2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИЖЕНИЯ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД

Второе направление проведенных исследований, касающееся компьютерного моделирования процессов сдвижения надугольной толщи, позволило выявить следующие факты и закономерности.

*Во-первых*, подтверждено, что для специфических условий залегания более крепких угольных пластов в массиве более слабых и легкодеформируемых пород кровли и почвы зона опорного давления имеет ограниченное распространение до 10-12 м в глубь нетронутого пласта. Последний менее подвержен разупрочнению (в сравнении с вмещающими породами) и по причине повышенной жесткости является концентраторами напряжений; это генерирует значительную величину опорного давления, изменяющегося по длине лавы от  $(2,5...3,4) \gamma H$  до  $(5,0...6,2) \gamma H$  за исключением зоны работы комбайна. Сочетание высоких концентраций напряжений при ограниченных размерах зоны опорного давления указывает на активный процесс разупрочнения пород кровли и почвы (частично также угольного пласта) на достаточно коротком участке впереди забоя; этот процесс протекает во времени и с увеличением скорости  $V_c$  подвигания лавы время воздействия концентраций напряжений снижается, – следовательно, уменьшается степень разупрочнения и ограничивается опускание кровли пласта. Данный вывод подтверждает рекомендации, сформулированные на базе мониторинга работы струговой лавы.

*Во-вторых*, при ширине захвата  $B = 0,7$  м уступ забоя является весьма значительным концентратором горного давления и в районе работы испол-

нительного органа его величина возрастает до  $(8,4...10,0) \gamma H$ . Таким образом, в случае длительной остановки забоя участок размещения комбайна является наиболее опасным с точки зрения интенсивности проявления горного давления и здесь в первую очередь необходимо выполнить операцию задвижки к груди забоя ближайших 6-8 секций для снижения действующих на них нагрузок. После возобновления очистных работ следует на указанном участке постепенно выйти на величину вынимаемой мощности пласта (предшествующей остановке лавы) после выемки необходимого количества полос для требуемой раздвижки гидростоек. Здесь также справедливо положение о том, что при повышенной скорости подачи комбайна (и скорости подвигания очистного забоя в целом) сокращается время для развития реологических процессов опускания кровли, обуславливающих формирование нагрузки на крепь, и, в конечном итоге, в большей мере сохраняется высота раздвижки гидростоек секций.

*В-третьих*, моделированием установлено, что, несмотря на высокую концентрацию напряжений в районе работы исполнительного органа комбайна (при  $B = 0,7$  м), разупрочнение и расслоение пород кровли (для горно-геологических условий 161 лавы пласта  $C_6$ ) происходит, как правило, в верхних частях более жестких слоев и распространяется на глубину в массив до 2,5-3,0 м. Таким образом, процесс разупрочнения пород кровли не имеет непрерывного распространения в наиболее интенсивной зоне опорного давления, а развивается в локальных областях, чередующихся с устойчивыми объемами пород, и характеризуется относительно небольшими размерами. Это позволяет прогнозировать невысокую вероятность обрезания основной кровли по груди забоя и образования вывалов в непосредственной кровле.

*В-четвертых*, в рассматриваемых горно-геологических условиях установлена следующая эпюра опускания кровли на самом активном участке – в районе работы исполнительного органа: в плоскости забоя и на расстоянии «в массив» до 0,1 м прогнозируются опускания до 100-140 мм, которые увеличиваются в поперечном сечении лавы до 330-380 мм на задней кромке ограждения секции. Такая закономерность развития опускания кровли по ширине лавы вполне соответствует геометрии большинства типов механизированных крепей, применяемых, например, в Западном Донбассе; так, что можно утверждать о высокой степени их адаптации к характеру проявлений горного давления. С другой стороны, опускания кровли в 100-140 мм происходят в массиве перед самой плоскостью забоя, и если производить присечку пород кровли, то мы снижаем прогнозируемое опускание кровли на отмеченную величину и на эту же величину сохраняем раздвижку гидростоек и высоту рабочего пространства лавы. Приведенные закономерности справедливы при скорости подвигания очистного забоя не менее 4-5 м/сут., которую и рекомендуется поддерживать (а при возможности и повышать) в условиях схожих с моделируемыми.

### 13.3. ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Третьей позицией обобщения полученных результатов является обоснование направлений дальнейших исследований с конечной целью разработки и расширения рекомендаций по выбору рациональных технологических параметров выемки угля высокопроизводительными очистными комплексами на широкий спектр горно-геологических и горнотехнических условий отработки пологих угольных пластов.

*Во-первых*, необходим постоянный мониторинг работы различного очистного оборудования, осуществляющего выемку угля в различных горно-геологических условиях для расширения базы экспериментальных данных по влиянию геомеханических и технологических факторов на развитие нагрузки на механизированную крепь. Здесь уже апробированную методологию съема исходных показаний целесообразно дополнить фиксацией сброса давления в перегруженных гидростойках и уменьшения при этом величины их раздвижки; также следует изучить процесс перераспределения нагрузки на соседние секции при их передвижке и переходе в податливый режим работы. Актуальность таких исследований заключается в своевременном выявлении возможного очага возникновения процесса посадки на «жесткую базу» и выработки мероприятий по его недопущению.

*Во-вторых*, актуален комплекс исследований на базе многофакторного моделирования по выявлению закономерностей связи нагрузки на крепь с параметрами структуры (мощность слоев, интенсивность трещиноватости и тому подобное) и механическими характеристиками литологических разностей кровли и почвы во всем диапазоне их изменения в сложных горно-геологических условиях отработки пологих угольных пластов. Полученное семейство закономерностей влияния геомеханических факторов в перспективе развивается в направлении учета технологических факторов (длина лавы, вынимаемая мощность пласта, скорость подвигания и время простоя очистного забоя и тому подобное), которые дополняются влиянием конструктивных и режимных параметров очистного оборудования (скорость подачи комбайна, ширина захвата его исполнительного органа, реакция отпора секций, их геометрия и тому подобное). Закономерным итогом является создание комплекса рекомендаций по выбору рациональных параметров ведения очистных работ и соответствующего оборудования в зависимости от геомеханических условий выемки угольных пластов.

*В-третьих*, на базе планируемых исследований целесообразно выработать стратегию развития угледобычи на ближайшую и среднесрочную перспективу как в плане совершенствования технологических схем очистной выемки, так и создания пакета технических требований к вновь проектируемому очистному оборудованию применительно к условиям, например, Западного Донбасса.



## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Самарский, А.А. Численные методы [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 429 с.
2. Самарский, А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент [Текст] / А.А. Самарский // Вестник АН СССР. – 1979. – №5. – С. 38-49.
3. Фуксман, А.Л. Технологические аспекты создания программных систем [Текст] / А.Л. Фуксман. – М.: Статистика, 1979. – 184 с.
4. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 110 с.
5. Ершов, А.П. Смешанные вычисления [Текст] / А.П. Ершов // В мире науки. – 1984. – №6. – С. 28-42.
6. Дейкстра, Э. Дисциплина программирования [Текст] / Э. Дейкстра. – М.: Мир, 1978. – 274 с.
7. Parnas, D.L. On the criteria to be used in decomposing systems into modules / D.L. Parnas // Comm.ACM. – 1972. – V.15, N.12. – P. 1053-1058.
8. Горбунов-Посадов, М.М. Пакет Сафра: программное обеспечение вычислительного эксперимента [Текст] / М.М. Горбунов-Посадов, В.Я. Карпов, Д.А. Корягин и др. // Алгоритмы и алгоритмические языки. Пакеты прикладных программ. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1983. – С. 12-50.
9. Фути, К. Языки программирования и схемотехника СБИС [Текст] / К. Фути, Н. Судзуки. – М.: Мир, 1988. – 224 с.
10. Горбунов-Посадов, М.М. Системное обеспечение пакетов прикладных программ [Текст] / М.М. Горбунов-Посадов, Д.А. Корягин, В.В. Мартынюк. – М.: Наука, 1990. – 208 с.
11. Бабаев, И.О. Язык Декарт – входной язык системы СПОРА [Текст] / И.О. Бабаев, Ф.А. Новиков, Т.И. Петрушина // Прикладная информатика. – М.: Финансы и статистика, 1981. – Вып.1. – С. 35-72.
12. Вирт, Н. Язык программирования Оберон (пересмотренное сообщение) [Текст] / Н. Вирт // Системная информатика. – Новосибирск: Наука, 1991. – Вып.1. – С. 40-63.
13. Амосин, Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики [Текст] / Б.З. Амосин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 143 с.
14. Кузнецов Г.Н. Методы и средства решения задач горной геомеханики [Текст] / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
15. Бахвалов, Н.С. Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов. – М.: Наука, 1973. – 632 с.
16. Калиткин, Н.Н. Численные методы [Текст] / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 197 с.
17. Деннис Д., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений [Текст] / Д. Деннис, Р. Шнабель. – М.: Мир, 1988. – 440 с.

18. Протоdjаконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М.М. Протоdjаконов. – Ч.1. Давление горных пород. – М.-Л.: ОГИЗ. – 1931. – 104 с.
19. Цимбаревич, П.М. Механика горных пород [Текст] / П.М. Цимбаревич. – М.: Углетехиздат, 1948. – 183 с.
20. Слесарев, В.Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1952. – 379 с.
21. Слесарев, В.Д. Механика горных пород и рудничное крепление [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1948. – 303 с.
22. Терцаги, К. Инженерная геология [Текст] / К. Терцаги. – М.-Л.: ОНТИ, 1935. – 452 с.
23. Герман, А.П. Обзор теоретических подходов в изучении горного давления [Текст] / А.П. Герман // Сб. Труды совещания по управлению горным давлением. – М.: Угнтехиздат, 1948. – С. 47-61.
24. Мизюмский, В.А. Об определении горного давления методами механики сплошной среды [Текст] / В.А. Мизюмский // В сб. Вопросы геотехники. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – С. 145-164.
25. Джанджгава, И.Д. К теории горного давления в горизонтальных выработках [Текст] / И.Д. Джанджгава. – М.: Изд-во МГИ, 1957. – 87 с.
26. Леонтьев, В.Н. О теориях горного давления и очередных задачах научных исследований [Текст] / В.Н. Леонтьев // Вопросы горного дела. – М.: Углетехиздат, 1959. – Вып. 2. – С. 2-34.
27. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 384 с.
28. Феннер, Р. Исследование горного давления [Текст] / Р. Феннер // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 5-58.
29. Лабасс, А. Давление горных пород в угольных шахтах [Текст] / А. Лабасс // Вопросы теории горного давления. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-99.
30. Сажин, В.С. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг горных выработок различного очертания [Текст] / В.С. Сажин. – М.: Наука, 1968. – 94 с.
31. Парасюк, О.С. Упруго-пластическая задача с небигармоническим пластическим состоянием [Текст] / О.С. Парасюк. – ДАН СССР. – 1948. – Т.13. – №4. – С. 415-446.
32. Ивлев, Д.Д. Приближенное решение упруго-пластических задач теории идеальной пластичности [Текст] / Д.Д. Ивлев. – ДАН СССР. – 1957. – Т.113. – №2. – С. 234-262.
33. Талобр, Ж. Механика горных пород [Текст] / Ж. Талобр. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 168 с.
34. Перлин, П.И. Упруго-пластическое распределение напряжений вокруг отверстий [Текст] / П.И. Перлин // Труды МФТИ. – 1960. – №5. – С. 117-134.

35. Лехницкий, С.Г. Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения [Текст] / С.Г. Лехницкий // Тр. ВНИМИ. – 1962. – Вып. 45. – С. 155-179.

36. Протосеня, А.Г. Упруго-пластическая задача для выработки эллиптической формы при условии пластичности Кулона [Текст] / А.Г. Протосеня, Т.Н. Горшунова // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – №5. – С. 32-40.

37. Ержанов, Ж.С. Ползучесть горных пород и ее влияние на напряженно-деформированное состояние сооружений [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ж.С. Ержанов. – Новосибирск, 1962. – 39 с.

38. Протосеня, А.Г. Приложение модели ползуче-пластического тела для изучения деформирования пород вокруг выработок глубоких горизонтов [Текст] / А.Г. Протосеня // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1974. – Вып. 1. – С. 10-15.

39. Оловянный, А.Г. Исследование устойчивости выработок и неустановившегося давления на крепь с учетом предельных деформаций горных пород [Текст] / А.Г. Оловянный, Б.З. Амосин // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1974. – Вып. 1. – С. 16-21.

40. Виноградов, В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления [Текст] / В.В. Виноградов, В.Т. Глушко. – М.: Недра, 1982. – 214 с.

41. Константинова, С.А. Устойчивость слоистого соляного массива вокруг выработки с учетом нелинейности деформирования и разрыхления приконтурных пород в процессе ползучести [Текст] / С.А. Константинова, И.Ф. Саврасов // Изв. вузов. Горный журнал. – 1981. – №8. – С. 35-40.

42. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст] / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.

43. Фисенко, Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг горной выработки [Текст] / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.

44. Ставрогин, А.Н. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах [Текст] / А.Н. Ставрогин, А.Г. Протосеня. – М.: Недра, 1985. – 271 с.

45. Баклашов, И.В. Механические процессы в породных массивах [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1986. – 272 с.

46. Линьков, А.М. Об учете запредельных деформаций при решении задач горной геомеханики [Текст] / А.М. Линьков // Тр. ВНИМИ. – 1977. – Вып. 103. – С. 71-76.

47. Протосеня, А.Г. Предельное деформирование горных пород с учетом упрочнения и разупрочнения [Текст] / А.Г. Протосеня, А.Н. Ставрогин, А.К. Черников // В сб. Аналитические и численные методы исследования в механике горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1981. – С. 129-134.

48. Оловянный, А.Г. Осесимметричное деформирование пластических разупрочняющихся пород вокруг выработок [Текст] / А.Г. Оловянный // В сб. Проблемы механики подземных сооружений. – Л.: ЛГИ, 1979. – С. 89-92.

49. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений [Текст] / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1982. – 270 с.
50. Булычев, Н.С. Влияние технологической схемы сооружения капитальных выработок на характер взаимодействия крепи с массивом пород [Текст] / Н.С. Булычев // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1974. – Вып. 1. – С. 3-9.
51. Алимжанов, М.Г. К вопросу об определении оптимальных параметров податливых крепей горизонтальных выработок [Текст] / М.Г. Алимжанов // Сб. Вопросы механики горных пород. – М.: Наука, 1967. – 221 с.
52. Пеньковский, Г.Ф. К расчету податливых крепей горных выработок глубокого заложения [Текст] / Г.Ф. Пеньковский // Изв. вузов. Горный Журнал. – 1983. – №1. – С. 19-24.
53. Либерман, Ю.М. Давление на крепь капитальных горных выработок [Текст] / Ю.М. Либерман. – М.: Наука, 1969. – 119 с.
54. Резников, М.А. Оценка устойчивости подземных выработок значительной протяженности [Текст] / М.А. Резников // Изв. вузов. Горный журнал. – 1984. – №8. – С. 40-43.
55. Ржевский, В.В. О научных основах расчетов давления горных пород [Текст]. Ч. 1 / В.В. Ржевский // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – №6. – С. 1-9.
56. Ржевский, В.В. О научных основах расчетов давления горных пород [Текст]. Ч. 11 / В.В. Ржевский // Изв. вузов. Горный журнал. – 1982. – №7. – С. 1-10.
57. Кидет, В.В. Обрушение свода в сыпучей среде [Текст] / В.В. Кидет, В.М. Калобашкин, Е.Е. Ловецкий, В.И. Селяков // Изв. вузов. Горный журнал. – 1980. – №8. – С. 16-19.
58. Заславский, Ю.З. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт [Текст] / Ю.З. Заславский, А.Н. Зорин, И.Л. Черняк. – К.: Техніка, 1972. – 156 с.
59. Басинский, Ю.М. Зависимость проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Центрального района Донбасса от основных геологических и горнотехнических факторов [Текст] / Ю.М. Басинский, Е.А. Иванов // Тр. ВНИМИ. – 1972. – Вып. 85. – С. 79-84.
60. Бройнер, Г. Конвергенция и сопротивление крепи в горизонтальных выработках, особенно подверженных деформациям [Текст] / Г. Бройнер // Глюкауф. – 1965. – №25. – С. 13-18.
61. Басинский, Ю.М. Выбор параметров крепи капитальных выработок на основе прогнозирования смещения пород [Текст] / Ю.М. Басинский // Тр. ВНИМИ. – 1978. – Вып. 109. – С. 37-44.
62. Басинский, Ю.М. Исследование влияния сопротивления крепи на величину и скорость смещения пород на контуре капитальной выработки [Текст] / Ю.М. Басинский, Е.А. Иванов // Тр. ВНИМИ. – 1967. – Вып. 63. – С. 409-428.

63. Ардашев, К.А. Рекомендации по расчету смещений контура и нагрузок на крепь горных выработок по экспериментальным показателям деформирования пород за пределом прочности [Текст] / К.А. Ардашев, Б.З. Амосин, В.Ф. Кошелев. – Л., 1982. – 34 с.
64. СНИП II-94-80 [Текст]. – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.
65. Амосин, Б.В. Геомеханические основы определения параметров расчета и автоматизированного проектирования крепи капитальных выработок угольных шахт [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Б.В. Амосин. – Л.: ЛГИ, 1989. – 468 с.
66. Симанович, Г.А. Управление режимами взаимодействия породного массива с крепью горных выработок на основе регулирования ее деформационно-силовой характеристикой [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Г.А. Симанович. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 1993. – 408 с.
67. Ковалевская, И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок» [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / И.А. Ковалевская. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – 349 с.
68. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 540 с.
69. Ержанов, Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород [Текст] / Ж.С. Ержанов, Т.Д. Каримбаев. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.
70. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
71. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов при решении геотехнических задач и программа «Геомеханика» [Текст]: учеб. пособие / А.Б. Фадеев, П.И. Репина, Э.К. Абдылдаев. – Л.: ЛИСИ, 1982. – 48 с.
72. Потапов, А.В. Численное моделирование нестационарных геомеханических процессов с низким внутренним трением [Текст]: дис...канд. техн. наук / А.В. Потапов. – М.: ИГД РАН, 1991. – 168 с.
73. Бабиюк, Г.В. Оценка напряженного состояния массива при проведении выработки [Текст] / Г.В. Бабиюк, А.И. Мележик, С.А. Курман // Уголь Украины. – 2002. – №3. – С. 22-26.
74. Самоделкина, Н.А. Об одном способе учета реологических свойств пород в конечноэлементном анализе геомеханических процессов [Текст] / Н.А. Самоделкина // ФТПРПИ. – 2003. – № 3. – С. 14-20.
75. Солодянкин, А.В. Оценка напряженно-деформированного состояния породного массива вокруг очистных выработок комплексом численных методов [Текст] / А.В. Солодянкин, И.Ю. Старотиторов // Сб. научн. трудов: Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – С. 73-74.
76. Ламонина, Е.В. Численное моделирование трещиноватых скальных массивов [Текст]: дис...канд. техн. наук / Е.В. Ламонина. – М.: МГГУ, 2006. – 182 с.
77. Kovalevska, I., Vivcharenko, A. & Fomychov, V. Optimization of frame-bolt support in the development workings, using computer modeling method / XXII

World mining congress & Expo (11-16 September). Volume I. – Istanbul. – 2011. – P. 267-278.

78. Фомичев, В.В. Предпосылки построения расчетных моделей рамно-анкерной крепи с учетом нелинейных характеристик поведения физических сред [Текст] / В.В. Фомичев // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 3. – С. 13-16.

79. Бондареко, В.И. Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.В. Мартовицкий, А.Ф. Копылов. – Днепропетровск: ТОВ «Підприємство «Дріант», 2010. – 328 с.

80. Бондаренко, В.И. Развитие научных основ повышения устойчивости горных выработок шахт Западного Донбасса [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, А.В. Мартовицкий, И.А. Ковалевская, В.Г. Черватюк. – Днепропетровск: ЛізуновПрес, 2010. – 340 с.

81. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок [Текст] / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Вільпо, 2002. – 372 с.

82. Байсаров, Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых выработок [Текст] / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, А.И. Демченко. – Днепропетровск: ЧП «Ли́ра ЛТД», 2005. – 240 с.

83. КД 12.01.01.501 – 98. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги [Текст]. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 1999. – 42 с.

84. КД 12.01.01. 502 – 98. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Порядок та організація [Текст]. – Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 1999. – 14 с.

85. Временный технологический регламент по охране и поддержанию выемочных выработок при их повторном использовании [Текст]. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 23 с.;

86. Технологический регламент поддержания повторно используемых выемочных штреков комбинированными охранными системами [Текст]. – Днепропетровск – Донецк: «ВИК», 2009. – 36 с.

87. Бондаренко, В.И. Геомеханика взаимодействия анкерной и рамной крепей горных выработок в единой грузонесущей системе [Текст]: монография / В.И. Бондаренко, Ю.Я. Чередниченко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, А.В. Вивчаренко, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: ТОВ «ЛізуновПрес», 2010. – 174 с.

88. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони [Текст]. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с.

89. КД 12.01.01.201 – 98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания [Текст]. – К.: УкрНИИ, 1998. – 149 с.

90. Зборщик, М.П. Охрана выработок глубоких шахт в зонах разгрузки [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко. – К.: Техніка, 1991. – 248 с.

91. Савостьянов, А.В. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / А.В. Савостьянов, В.Г. Ключков. – К.: УМК ВО, 1992. – 276 с.

92. Акимов, А.Г. Сдвигение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений [Текст] / А.Г. Акимов, В.Н. Земисов, Н.Н. Кацнельсон и др. – М.: Недра, 1970. – 224 с.

93. Зборщик, М.П., Назимко В.В. Механизм сдвижения пород и перераспределения напряжений вокруг выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотненной толще [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко. – В респ. межвед. науч.-техн. сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – 1986. – Вып. 73. – С. 48-52.

94. Соппротивление материалов [Текст] / Под ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища школа, 1979. – 696 с.

95. Руппенейт, К.В. Некоторые вопросы механики горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 364 с.

96. Заря, Н.М. Схема механизма сдвижения толщи пород при выемке пологих пластов угля одиночной лавой [Текст] / Н.М. Заря, Ф.И. Музафаров // Уголь Украины, 1966. – №12. – С. 9-12.

97. Зборщик М.П., Костоманов А.И. Определение опорного давления в толще пород при разработке свиты пологих пластов [Текст] / М.П. Зборщик, А.И. Костоманов. – В респ. межвед. науч.-техн. сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. – 1968. – Вып. 5. – С. 9-17.

98. Зборщик, М.П. Закономерности горизонтальных сдвижений толщи пород при отработке пологих пластов [Текст] / М.П. Зборщик, В.В. Назимко // Уголь Украины. – 1986. – №5. – С. 18-22.

99. Давыдович, И.Л. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт [Текст] / И.Л. Давыдович, Н.П. Бажин, Ю.П. Коренной, Е.В. Куняев и др. – М.: Недра, 1971. – 288 с.

100. Сдвигение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР [Текст] / под ред. С.Г. Авершина. – М.: Углетехиздат, 1958. – 250 с.

101. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 380 с.

102. Медведчук, Н.Д. Влияние скорости подвигания очистного забоя на проявление горного давления при выемке угольных пластов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н.Д. Медведчук. – Днепропетровск, 1967. – 252 с.

103. Кольчик, Е.И. Геомеханическое обоснование устойчивости выемочных выработок при интенсивной отработке угольных пластов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Е.И. Кольчик. – Днепропетровск, 2007. – 306 с.

104. Скипочка, С.И. Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав [Текст] / С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.Ю. Ку克林. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 248 с.

105. Аносов, О.С. Управление горным давлением при разработке угольных пластов [Текст] / О.С. Аносов, Н.С. Кузьменко, Г.В. Кудравец и др. – Донецк: Донбасс, 1990. – 303 с.

106. Прохоров, Д.О. Разработка метода прогнозирования проявлений горного давления при механизированной отработке пологих угольных пластов в слабых вмещающих породах [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.О. Прохоров; [Тульский государственный университет]. – Тула, 2000. – 18 с.

107. Звягильский, Е.Л. Динамика сдвижений земной поверхности при больших скоростях подвигания очистных забоев [Текст] / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, Е.В. Назимко и др. // Проблемы гірського тиску. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – №9. – С. 189-212.

108. Куклін, В.Ю. Геомеханічне обґрунтування параметрів способів кріплення та охорони виробок в нестійких породах при інтенсивному відпрацюванні пологих вугільних пластів [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / В.Ю. Куклін; [Інститут геотехнічної механіки]. – Дніпропетровськ, 2004. – 20 с.

109. Скипочка, С.И. Особенности геомеханики углепородного массива при высоких нагрузках на очистной забой [Текст] / С.И. Скипочка, А.В. Мухин, В.Ю. Куклин. – В сб.: Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2003. – №41. – С.16-22.

110. Четверик, М.С. Теория сдвижения массива горных пород и управления деформационными процессами при подземной выемке угля [Текст] / М.С. Четверик, Е.В. Андрощук. – Днепропетровск: РИА «Днепр VAL», 2004. – 148 с.

111. Байсаров, Л.В. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых горных выработок [Текст] / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, А.И. Демченко. – Днепропетровск: ЧП «Ли́ра ЛТД», 2005. – 240 с.

112. Кольчик, Е.И. Определение параметров зоны влияния очистной выемки при больших скоростях подвигания лав [Текст] / Е.И. Кольчик // Известия Донецкого горного института. – Донецк, 2007. – №2. – С. 17-21.

113. Медведчук, Н.Д. Влияние скорости подвигания очистного забоя на проявление горного давления при разработке пологих пластов [Текст] / Н.Д. Медведчук // Уголь Украины. – 1967. – №4. – С. 13-15.

114. Кузьменко, А.М. Влияние скорости подвигания лавы на напряженно-деформированное состояние окружающего массива горных пород [Текст] / А.М. Кузьменко, А.В. Савостьянов, В.Д. Рябичев // Матер. межд. конф. «Форум горняков». – Днепропетровск: НГУ, 2007. – С. 108-112.

115. Панфилова, Д.В. Распределение нагрузок на крепь по длине очистного забоя [Текст] / Д.В. Панфилова, А.В. Ремезов. – Уголь, 2008. – №11. – С. 10-11.

116. Якоби, О. Практика управления горным давлением [Текст] / О. Якоби. – М.: Недра, 1987. – 566 с.

117. Скипочка, С.И. Геомеханика охраны выемочных штреков в неустойчивых породах [Текст] / С.И. Скипочка, А.В. Мухин, В.Г. Черватюк. – Днепропетровск: НГА Украины, 2002. – 125 с.

118. Слесарев, В.Д. Управление горным давлением при разработке угольных пластов Донецкого бассейна [Текст] / В.Д. Слесарев. – М.: Углетехиздат, 1952. – 379 с.



119. Руппенейт, К.В. Давление и смещение горных пород в лавах пологопадающих пластов [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1957. – 222 с.
120. Борисов, А.А. Расчет горного давления в лавах пологих пластов [Текст] / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1964. – 267 с.
121. Черняк, И.Л. Управление состоянием массива горных пород [Текст] / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. – М.: Недра, 1995. – 395 с.
122. Руппенейт, К.В. Деформируемость массива трещиноватых горных пород [Текст] / К.В. Руппенейт. – М.: Недра, 1975. – 223 с.
123. Протодьяконов, М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве [Текст] / М.М. Протодьяконов, С.Е. Чирков. – М.: Наука, 1964. – 67 с.
124. Рац, М.В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород [Текст] / М.В. Рац, С.Н. Чернышов. – М.: Недра, 1970. – 159 с.
125. Усаченко, Б.М. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса [Текст] / Б.М. Усаченко, В.Я. Кириченко, А.В. Шмиголь. – М.: ЦНИИЭуголь, 1992. – 168 с.
126. Усаченко, Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок [Текст] / Б.М. Усаченко. – К.: Наукова думка, 1979. – 136 с.
127. Усаченко, Б.М. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизированных породах [Текст] / Б.М. Усаченко, В.Н. Чередниченко, И.Е. Головачанский. – К.: Наукова думка, 1990. – 144 с.
128. Хеллан, К. Введение в механику разрушения [Текст] / К. Хеллан. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
129. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения [Текст] / Ю.Г. Матвиенко. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
130. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров: справочное пособие [Текст] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
131. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст] / В.В. Виноградов. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
132. Яворский, В.Н. Обоснование параметров технологии отработки угольных целиков камерами в условиях шахт Западного Донбасса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Яворский. – Днепропетровск, 2000. – 140 с.
133. Симанович, А.М. Совершенствование способов охраны подготовительных выработок [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный, В.И. Малов, И.Л. Белинский. – Донецк: Донбасс, 1973. – 121 с.
134. Симанович, А.М. Охрана выработок на глубоких горизонтах [Текст] / А.М. Симанович, М.А. Сребный. – М.: Недра, 1976. – 144 с.
135. Гелескул, М.Н. Справочник по креплению капитальных и подготовительных горных выработок [Текст] / М.Н. Гелескул, В.Н. Каретников. – М.: Недра, 1982. – 479 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Раздел 1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	5
1    ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	5
1.1    История развития математического моделирования .....	5
1.2    Общая характеристика математического моделирования .....	10
2    ОБЩИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ .....	18
2.1    Особенности моделирования геомеханических систем .....	18
2.2    Развитие методов расчета проявлений горного давления .....	20
2.2.1    Диалектика развития аналитических методов прогноза проявлений горного давления в горной выработке .....	20
2.2.2    Развитие подходов к оптимизации режимов взаимодействия породного массива с крепью горных выработок .....	23
2.3    Тенденции применения МКЭ при исследовании геомеханических систем .....	30
Выводы .....	34
3    МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МКЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	35
3.1    Технология вычислительного эксперимента .....	35
3.2    Алгоритм постановки вычислительного эксперимента .....	38
3.3    Порядок проведения исследований НДС слоистого массива вокруг выработки .....	41
Выводы .....	44
4    ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МКЭ ПО РАСЧЕТУ НДС МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «МАССИВ-ОПОРНО-АНКЕРНАЯ И РАМНО АНКЕРНАЯ КРЕПИ-КРЕПЬ УСИЛЕНИЯ- ОХРАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ» .....	46
Раздел 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЕПИ ОЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК С ГОРНЫМ МАССИВОМ .....	62

5	ОСОБЕННОСТИ СДВИЖЕНИЯ ПОРОД НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ И МЕХАНИЗМ НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ВЫЕМОЧНЫХ ВЫРАБОТОК .....	62
5.1	Горнотехнические и геомеханические аспекты повторного использования выемочных выработок .....	62
5.2	Шахтные исследования развития перемещений породного контура выемочных выработок в процессе подвигания очистного забоя .....	65
5.3	Особенности сдвижения пород надугольной толщи на концевых участках лавы вблизи выемочных выработок .....	72
5.4	Основные научно-практические результаты по исследованию особенностей механизма нагружения крепежной и охранной систем и сдвижения надугольной толщи слабых пород .....	75
6	АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПОРОД ПРИ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ .....	79
6.1	Анализ процесса деформирования надугольного породного массива в окрестности очистного забоя .....	79
6.2	Исследование особенностей формирования зоны шарнирно-блокового сдвижения надугольной толщи в окрестности очистного забоя .....	86
6.3	Особенности сдвижения пород надугольной толщи при отработке угольных пластов в Западном Донбассе .....	92
7	РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ОЧИСТНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ СДВИЖЕНИИ СЛОИСТОЙ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ СЛАБЫХ ПОРОД .....	102
7.1	Механизм влияния структуры надугольной толщи пород на нагружение крепи .....	103
7.2	Механизм влияния деформационных свойств породных слоев надугольной толщи на нагружение крепи .....	111
7.3	Механизм влияния прочностных характеристик надугольной толщи пород на нагружение крепи .....	120
7.4	Механизм влияния реологических свойств надугольной толщи пород на нагружение крепи .....	122
7.5	Механизм влияния шага посадки основной кровли надугольной толщи на нагружение крепи .....	126

7.6	Механизм влияния реакции отпора крепи при сдвигении слоистой надугольной толщи слабых пород .....	128
8	РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ ПОРОД С УГЛЕДОБЫВАЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ .....	131
8.1	Методология нового подхода к выявлению закономерностей взаимосвязи геомеханических и технологических параметров очистной выемки с крепью угледобывающих комплексов .....	131
8.2	Методика исследования влияния геомеханических и технологических параметров очистной выемки на нагружение крепи угледобывающего комплекса .....	135
	ВЫВОДЫ .....	139
	Раздел 3. ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА .....	140
9	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА НАГРУЖЕНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ .....	140
9.1	Закономерности изменения давления в гидростойках крепи при различных скоростях подвигания очистного забоя .....	140
9.2	Мониторинг взаимодействия секций крепи с породами кровли по длине лавы .....	146
9.3	Исследование влияния скорости подачи и ширины захвата углевыемочной машины на нагружение крепи .....	148
10	ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАГРУЖЕНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ .....	152
10.1	Влияние структуры углевмещающей толщи пород на нагружение крепи .....	152
10.2	Влияние глубины расположения очистного забоя на нагружение крепи .....	157
10.3	Закономерности влияния шага посадки основной кровли на нагружение крепи .....	159
10.4	Закономерности влияния продолжительности остановок очистного забоя .....	161
	ВЫВОДЫ .....	165

Раздел 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КРЕПИ ОЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ГОРНЫМ МАССИВОМ .....	166
11 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИЖЕНИЯ УГЛЕВМЕЩАЮЩЕГО СЛОИСТОГО МАССИВА СЛАБЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ .....	166
11.1 Разработка и обоснование параметров компьютерной модели .....	166
11.2 Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния пород в окрестности очистного забоя .....	173
11.3 Расчет и анализ полных перемещений углевмещающего породного массива в окрестности очистного забоя .....	186
Выводы .....	189
12 ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИТУАЦИЙ ПОСАДКИ НА «ЖЕСТКУЮ БАЗУ» КОМПЛЕКСА 1МКД-80 .....	191
12.1 Краткая характеристика выемочного участка .....	191
12.2 Анализ явлений и фактов, связанных с посадкой на «жесткую базу» комплекса 1МКД-80 .....	191
12.3 Разработка и анализ геомеханической модели процессов сдвижения надугольной толщи .....	193
12.4 Компьютерное моделирование отвода воды дренажной выработкой .....	202
12.4.1 Обоснование и построение геомеханической модели состояния массива дренажного вентиляционного штрека .....	202
12.4.2 Анализ результатов экспериментальных исследований .....	206
Выводы .....	209
13 ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ .....	210
13.1 Закономерности нагружения крепи струговой установки .....	210
13.2 Компьютерное моделирование сдвижения углевмещающей толщи пород .....	217
13.3 Обоснование направления дальнейших исследований .....	219
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК .....	220
СОДЕРЖАНИЕ .....	229

Наукове видання

**Бондаренко В.І., Ковалевська І.А.,  
Симанович Г.А., Черватюк В.Г.**

**ГЕОМЕХАНІКА НАВАНТАЖЕННЯ КРІПЛЕННЯ  
ОЧИСНИХ І ПІДГОТОВЧИХ ВИРОБОК У  
ШАРУВАТОМУ МАСИВІ СЛАБКИХ ПОРІД**

Монографія

Російською мовою

Підписано до друку **27.06.12**. Формат 701/290 1/16.  
Папір офсет. Друк офсетний. Ум. друк. арк. **23,93**.  
Обл.-вид. арк. **27,09**. Тираж 300 прим. Замовлення №**270612**.

Видавництво ТОВ «ЛізуновПрес»  
49127, м. Дніпропетровськ, вул. Н. Данченка, 30/166  
Свідоцтво ДК №3597 від 06.10.2009 р.



**БОНДАРЕНКО Владимир Ильич**  
заведующий кафедрой подземной  
разработки месторождений  
Национального горного университета,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники,  
лауреат Государственной премии  
Украины в области науки и техники.

**КОВАЛЕВСКАЯ Ирина Анатольевна**  
профессор кафедры подземной  
разработки месторождений  
Национального горного университета,  
доктор технических наук, лауреат  
Государственной премии Украины  
в области науки и техники.



**СИМАНОВИЧ Геннадий Анатольевич**  
профессор кафедры подземной  
разработки месторождений  
Национального горного университета,  
доктор технических наук.

**ЧЕРВАТЮК Виктор Григорьевич**  
кандидат технических наук,  
лауреат Государственной премии  
Украины в области науки и техники,  
руководитель департамента по  
производству дирекции по добыче  
угля ДТЭК

